



# **KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH**

**Aus den Arbeiten des  
Instituts für Reaktorbauelemente  
der KFA Jülich**

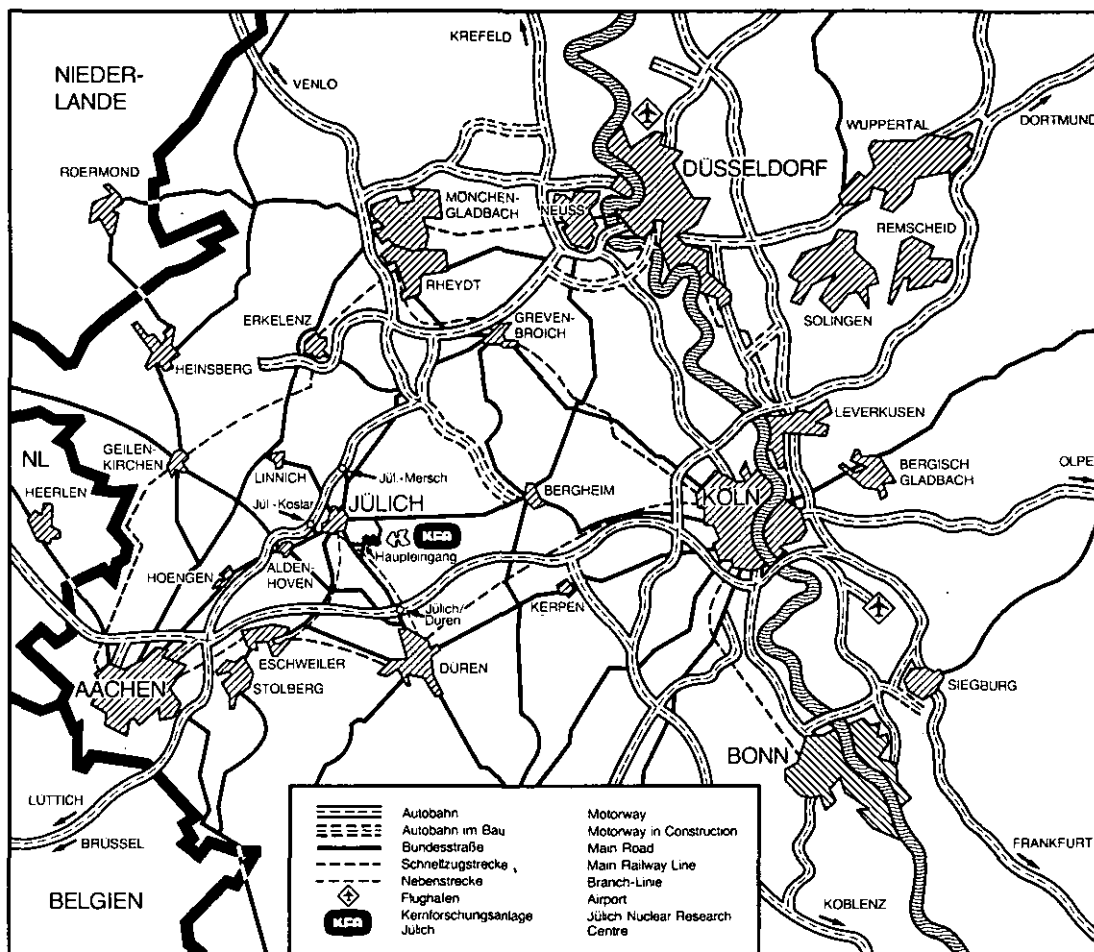
**Wissenschaftliche Vorträge des  
Festkolloquiums vom 2. September 1987  
in der KFA Jülich**

Zusammenstellung

F. Scholz

**Jül-Conf-64  
September 1988  
ISSN 0344-5798**

*dingelt.*



Als Manuskript gedruckt

### Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Jüli-Conf-64

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH  
Postfach 1913 · D-5170 Jülich (Bundesrepublik Deutschland)  
Telefon: 02461/610 · Telex: 833556-0 kf d

**Aus den Arbeiten des  
Instituts für Reaktorbauelemente  
der KFA Jülich**

**Wissenschaftliche Vorträge des  
Festkolloquiums vom 2. September 1987  
in der KFA Jülich**

Zusammenstellung

F. Scholz

### Bemerkung

Aus Anlaß des 60. Geburtstags von Herrn Prof. Dr. C.B. von der Decken und des 30jährigen Bestehens des Instituts für Reaktorbauelemente (IRB) der KFA Jülich fand am 2. September 1987 ein wissenschaftliches Festkolloquium statt. Aus diesem Anlaß wurden ausgewählte Arbeiten des IRB in 8 Vorträgen vorgestellt. Anschließend war Gelegenheit zur Besichtigung der Versuchseinrichtungen des Instituts, wobei auch über weitere Arbeiten an Ort und Stelle informiert wurde.

Auf vielfachen Wunsch werden nachfolgend die erweiterten Fassungen der Vorträge zusammengefaßt. Kurzfassungen waren bei dem Kolloquium erhältlich

### Note

On the occasion of Prof. Dr. C.B. von der Decken's 60th birthday and the 30th anniversary of the Institute of Reactor Components (IRB) at the KFA Jülich, a scientific commemorative colloquium was held on September 2, 1987. A selection of the IRB's work was presented here in eight lectures, followed by a tour of the Institute's experimental facilities with the opportunity to gather information about other activities on site.

Due to the large number of requests received an expanded version of the lectures has subsequently been compiled. Summaries were available at the Colloquium itself.

F. Scholz

## Inhalt

	Seite
Darstellung von Synthesegasen für Alkoholsynthesen H. Fedders, E. Riensche	1
Von Synthesegasen zu Energiealkoholen B. Höhle, H. Dötsch, K. Hammeke	14
Energiealkohole als Brennstoff P. Bröckerhoff	26
Fließen von Katalysatorpartikeln in einer Rauchgas- reinigungsanlage; Stoffübergang im Gebiet abgelöster Strömung - Zwei Beispiele für den Einsatz von Groß- rechnern zur Lösung technischer Probleme E. Achenbach	41
Wärme- und strömungstechnische Sonderfragen bei Wärmeaustauschern H.G. Groehn	54
Schwingungstechnische Auslegungsregeln für Wärmeübertrager im Hinblick auf Betriebs- sicherheit und Umweltbelastung E. Heinecke	65
Labor- und Reaktorversuche zur Ablagerung von Spaltprodukten im HTR-Primärkreislauf P. Biedermann, B. Sackmann	72
Sicherheitsaspekte bei der Betrachtung von HTR-Störfällen H. Barthels, N. Iniotakis	88

## Darstellung von Synthesegasen für Alkoholsynthesen

H. Fedders, E. Riensche

### Einleitung

Das bei der Umwandlung von schadstoffbelasteten festen, flüssigen und gasförmigen Energierohstoffen entstehende Synthesegas hat in der Regel eine andere Zusammensetzung als für nachfolgende Nutzanwendungen, wie der Synthese sauberer flüssiger Energieträger, erforderlich. An Synthesegase für die Synthese von Methanol und höheren Alkoholen werden besondere Anforderungen gestellt. Angestrebt wird eine bezüglich der Alkoholbildung stöchiometrische Gaszusammensetzung. Diese ist durch vergleichsweise niedrige  $H_2/CO$ -Verhältnisse charakterisiert. Für die Darstellung von Energie-Alkoholen nach unterschiedlichen Verfahren müssen  $H_2/CO$ -Verhältnisse etwa im Bereich zwischen 0,5 und 2 eingestellt werden können, entsprechend den jeweils angestrebten Reaktionsklassen der Alkoholbildung ( $H_2$  oder  $CO_2$  als Koproduct). Außerdem sind möglichst geringe Inertgasanteile vorteilhaft. Daher müssen Anstrengungen unternommen werden, die Verfahrensschritte Gas-erzeugung, Gasaufbereitung, Alkoholsynthese, Produktverwertung und Umweltschutz technisch in dem Rahmen zu optimieren, wie es in den Grenzen des gesamten Energieumwandlungssystems wirtschaftlich vertretbar ist.

### Synthesegasdarstellung im Umwandlungssystem

Bild 1 zeigt ein allgemeines Energie- und Stoffumwandlungssystem, dem von außen fossile Energierohstoffe und Hilfsstoffe zugeführt werden. Außerdem ist die Einkopplung von nicht fossiler Energie, beispielsweise von Hochtemperaturreaktorwärme unter Einsparung fossiler Energieträger möglich. Energiealkohole verlassen als alleiniges Produkt die Systemgrenze. Nebenprodukte treten in vernachlässigbarer Menge auf, die Rückstandsmenge ist vom Edukt abhängig, Emissionen sollen niedrig sein.

Die am Institut für Reaktorbauelemente durchgeführten Arbeiten /1/ zielen auf die Verbesserung des gesamten Umwandlungssystems vom Energierohstoff bis zur Nutzung von Energiealkoholen beim Verbraucher ab und zwar aus dem Blickwinkel der Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit.

Aus Bild 1 geht hervor, daß die Synthesegaserzeugung und -aufbereitung so-

wie die Alkoholsynthese Bausteine eines Energie- und Stoffumwandlungssystems sind, die innerhalb der eingetragenen Systemgrenzen eng miteinander verknüpft sind. Am Beispiel der Erdgasreformierung wurde gezeigt /2, 3/, daß

1. im Sinne der Alkoholsynthese optimal zusammengesetzte Synthesegase erzeugt und aufbereitet werden können, und
2. zur Simulation der Verhältnisse bei der Kohlevergasung sehr kohlenstoffreiche Synthesegase dargestellt werden können.

Bild 2 zeigt die Stöchiometrie der Dampfreformierung von  $\text{CH}_4$  und jene der Methanolsynthese. Diese einfache Darstellung zeigt, daß unter idealen Verhältnissen - d.h. alle C-haltigen Moleküle werden in Methanol überführt - ein Wasserstoffüberschuß unvermeidlich ist. In der konventionellen Praxis wird dieser Wasserstoff gemeinsam mit den nicht reagierten anderen Gasen zur Unterfeuerung des Steamreformers verwendet. In einem integrierten Netz wird man dagegen diesen Wasserstoff entweder anderwärtig verwenden oder fremdes CO- bzw.  $\text{CO}_2$ -reiches Gas der Methanolsynthese zuführen. Dadurch kann die Wasserstoffbilanz ausgeglichen werden.

Für die Synthese höherer Alkohole ist das  $\text{H}_2/\text{CO}$ -Verhältnis des Synthesegases von hervorragender Bedeutung. Wie Bild 3 zeigt, kann beispielsweise Äthanol aus Synthesegas mit dem  $\text{H}_2/\text{CO}$ -Verhältnis von zwei hergestellt werden, allerdings unter gleichzeitiger Bildung von ebensoviel Wasser. Für die Abtrennung des Wassers ist ein erheblicher Aufwand erforderlich. Wird ein größerer Aufwand bei der Synthesegasdarstellung getrieben, beispielsweise dadurch, daß das  $\text{H}_2/\text{CO}$ -Verhältnis auf den Wert eins reduziert wird, so kann Äthanol unter gleichzeitiger Bildung von  $\text{CO}_2$  synthetisiert werden. Der Aufwand für die Abtrennung von  $\text{H}_2\text{O}$  entfällt,  $\text{CO}_2$  entweicht gasförmig. Die Probleme bei der Darstellung von höheren Alkoholen sind analog zu betrachten.

### Pilotanlage

Das Blockschaltbild (Bild 4) zeigt das apparatetechnische Ergebnis unserer Überlegungen zu einer Versuchsanlage, mit der wir die offenen verfahrenstechnischen Fragen zur Alkoholsynthese lösen helfen möchten. Der Reformer ist identisch mit der bewährten Versuchsanlage EVA I, die mit Erdgas,  $\text{H}_2\text{O}$  und  $\text{CO}_2$  gespeist werden kann. Die EVA, die heliumbeheizte Einrohrversuchs-

anlage zur Untersuchung des Dampfreformierungsprozesses, ist seit 1972 in Betrieb und hat wertvolle Versuchsergebnisse auf dem Gebiet der Anwendung nuklearer Prozeßwärme geliefert /4/. Dank ihrer Größe und Flexibilität eignet sie sich vorzüglich, Synthesegase in ausreichender Menge, z.B. 600 Nm<sup>3</sup>/h, und variabler Zusammensetzung für die nachgeschaltete Alkoholsynthese zu liefern. Das von EVA I gelieferte Synthesegas kann in einer nachgeschalteten zur Zeit in Bau befindlichen Amisol-Wäsche in dem Maße von CO<sub>2</sub> befreit werden, wie es für die nachfolgende Synthese erforderlich ist. Das ausgewaschene CO<sub>2</sub> wird als Wertstoff wieder vor den Reformer gefahren. Diese relativ große CO<sub>2</sub>-Menge besteht überwiegend, d.h. zu über 70 % aus CO<sub>2</sub>, das in der Amisolwäsche rückgewonnen und wieder vor den Reformer gefahren wird.

#### Detailprobleme der Synthesegasdarstellung

In Bild 5 wurde der Volumenanteil von H<sub>2</sub> über dem CO-Anteil von Synthesegasen aufgetragen, wie sie nach verschiedenen Verfahren der Kohlevergasung erzeugt werden. Bild 6 zeigt, daß mit der CO<sub>2</sub>-Zuspeisung in den Reformer solche H<sub>2</sub>- und CO-Werte erreicht werden, wie sie die Lurgi-Druckvergasung liefert. Sollen die hohen CO-Werte der anderen in Bild 5 aufgeführten Verfahren im Synthesegas erreicht werden, so ist eine H<sub>2</sub>-Abtrennung aus dem Synthesegas erforderlich.

Ein weiteres Problem der Darstellung synthesesegerechter Gasmischungen besteht im Rest-CH<sub>4</sub>-Gehalt des vom Reformer gelieferten Synthesegases. CH<sub>4</sub> ist im Sinne der Alkoholsynthese inert. Bild 7 zeigt den CH<sub>4</sub>-Gehalt des Synthesegases auf der Ordinate in Abhängigkeit von der Temperatur jeweils für den Fall thermodynamischen Gleichgewichts. Bei 800 °C und 20 bar beträgt dieser ca. 7 Prozent. Erhöht man das O/C-Verhältnis durch Verdreifachung der H<sub>2</sub>O- und CO<sub>2</sub>-Mengen, so fällt der Rest-CH<sub>4</sub>-Wert auf ca. 1 Prozent. Den gleichen Effekt erreicht man, wenn man dem Reformer bei 800 °C Sauerstoff entsprechend etwa 20 Prozent der CH<sub>4</sub>-Menge zuspeist. Vorausgesetzt das Reformerrohr weist eine hinreichende Festigkeit bei der erreichten Temperatur von 940 °C auf, stellt dieses "Sekundäre Reformieren" eine im Rahmen des Gesamtsystems zu wertende Alternative zum großen H<sub>2</sub>O- und CO<sub>2</sub>-Einsatz dar.

Ein ganz besonderes Problem beim Reformierungsprozeß liegt in der Rußbil-



dung. Unsere Berechnungen zeigten, daß die Rußbildung insbesondere bei der Abkühlung von Reformergasen innerhalb bestimmter Temperaturgrenzen auftritt. Bei kleinen  $\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_4$ -Verhältnissen des Feed und bei hohen Reformierungsendtemperaturen ist eine Rußbildung unvermeidlich. Maßgeblich für die gebildete Rußmenge ist das Boudouard-Gleichgewicht und die Kinetik dieser Reaktion. Nach vorlaufenden Laborexperimenten wurden in EVA I Messungen der erzeugten Rußmengen vorgenommen. Wie Bild 8 zeigt, liegt die bei der Abkühlung durchlaufene Rußgrenze dann bei 780 °C, wenn Erdgas/ $\text{H}_2\text{O}$ -Gemisch beispielsweise mit einem  $\text{H}_2\text{O} : \text{CH}_4$ -Verhältnis von 1,5 so weit reformiert worden ist, daß die Gaszusammensetzung einer Gleichgewichtstemperatur von 800 °C entspricht - oder bei  $\text{H}_2\text{O} : \text{CH}_4 = 2,5$  und einer Gleichgewichtstemperatur von 850 °C. Beim vorliegenden Spaltrohr mit innerer Rückführung bildet sich in 30 Tagen 1 kg Ruß - oder  $10^{-5}$  der zugeführten Kohlenstoffatome wurden als Ruß nachgewiesen. Die Rußmenge verzehnfacht sich, wenn bei  $\text{H}_2\text{O} : \text{CH}_4 = 1,5$  die Temperatur von 800 auf 825 °C angehoben wird.

Das Arbeitsprogramm des oben erläuterten Vorhabens kann wie folgt zusammengefaßt werden:

Anhand von thermodynamischen Berechnungen der einzelnen Teilprozesse und Einbeziehung derer wechselseitiger Einflüsse sollen verfahrenstechnische Verbesserungsmöglichkeiten des Gesamtsystems ermittelt werden. In Fällen, in denen kinetische Effekte und zunächst nicht berechenbare Stoffübergangsphänomene eine Rolle spielen, müssen die experimentellen Untersuchungen erforderliche Aufschlüsse liefern. Für die Weiterentwicklungen beim Steam-Reforming-Prozeß und bei der Gasaufbereitung wird zunächst in Laborversuchen das Entwicklungspotential abgegrenzt. Positiv verlaufende Laborexperimente erfordern dann eine nachfolgende Überprüfung im Pilotmaßstab, wozu die vorhandene Pilotanlage gute Voraussetzungen bietet.

Literatur

- /1/ von der Decken, C.B., et al.  
Energie-Alkohle  
Jül-Spez-392 (1987), Kernforschungsanlage Jülich GmbH
  
- /2/ Höhle, B., et al.  
Synthesis Gas Production and Synthesis of Energy Alcohol  
VII. Intern. Symp. on Alcohol Fuels, Paris 1986
  
- /3/ Fedders, H., Riensch, E.,  
Wärmeübergang und Kinetik bei der Methan-Reformierung mit  $H_2O$ - $CO_2$ -Ge-  
mischen in EVA I  
Jül-Spez-419 (1987), Kernforschungsanlage Jülich GmbH
  
- /4/ Nukleare Fernenergie  
Zusammenfassender Bericht  
Jül-Spez-303 (1985), Kernforschungsanlage Jülich GmbH

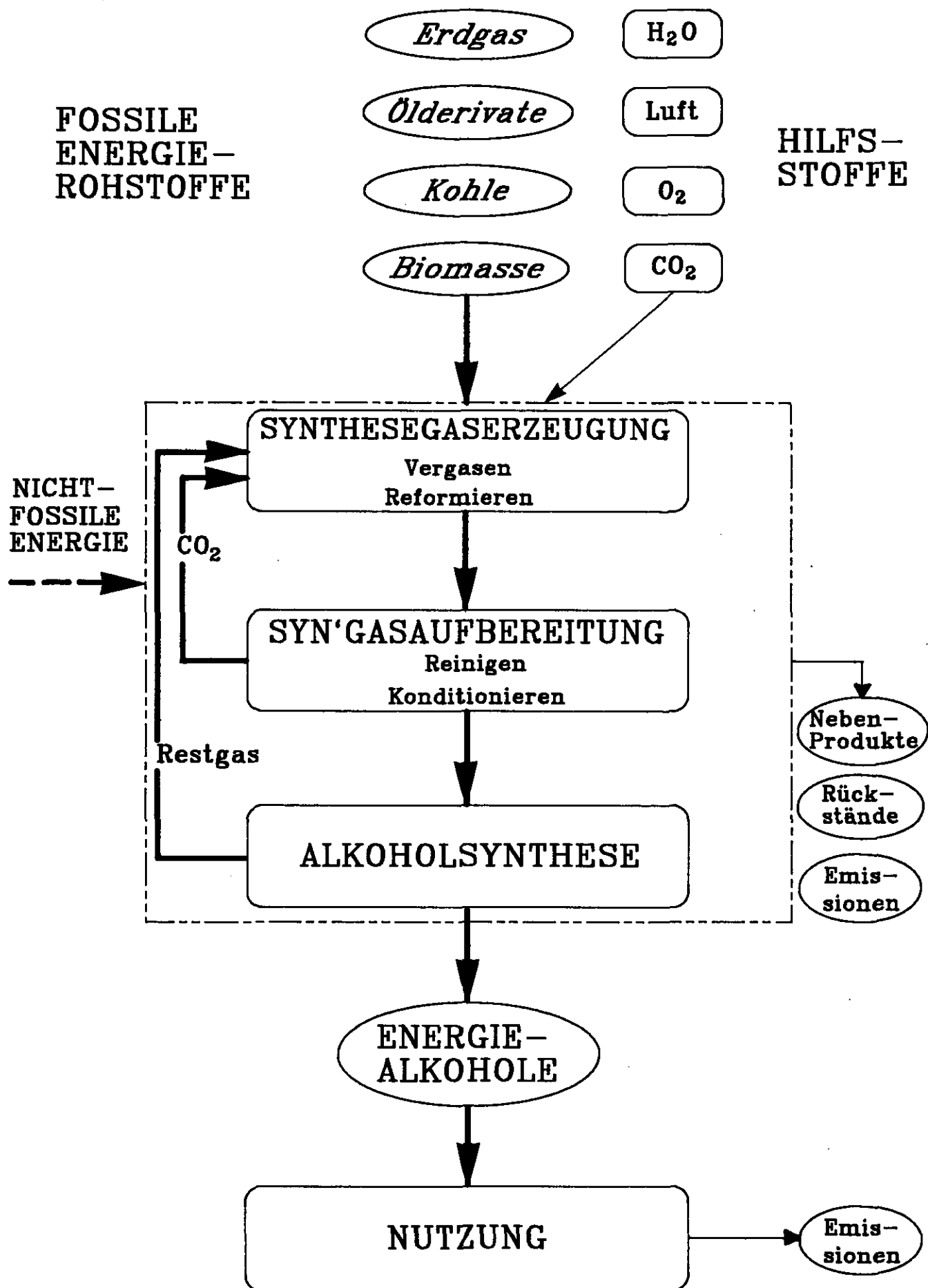
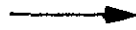


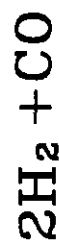
Bild 1: Synthesegasdargestellung bei Alkoholsynthesen



Reformierung



Methanol-



Synthese



Überschuß



Bild 2 Stöchiometrie der Methan-Dampfpreformierung und der Methanolbildung

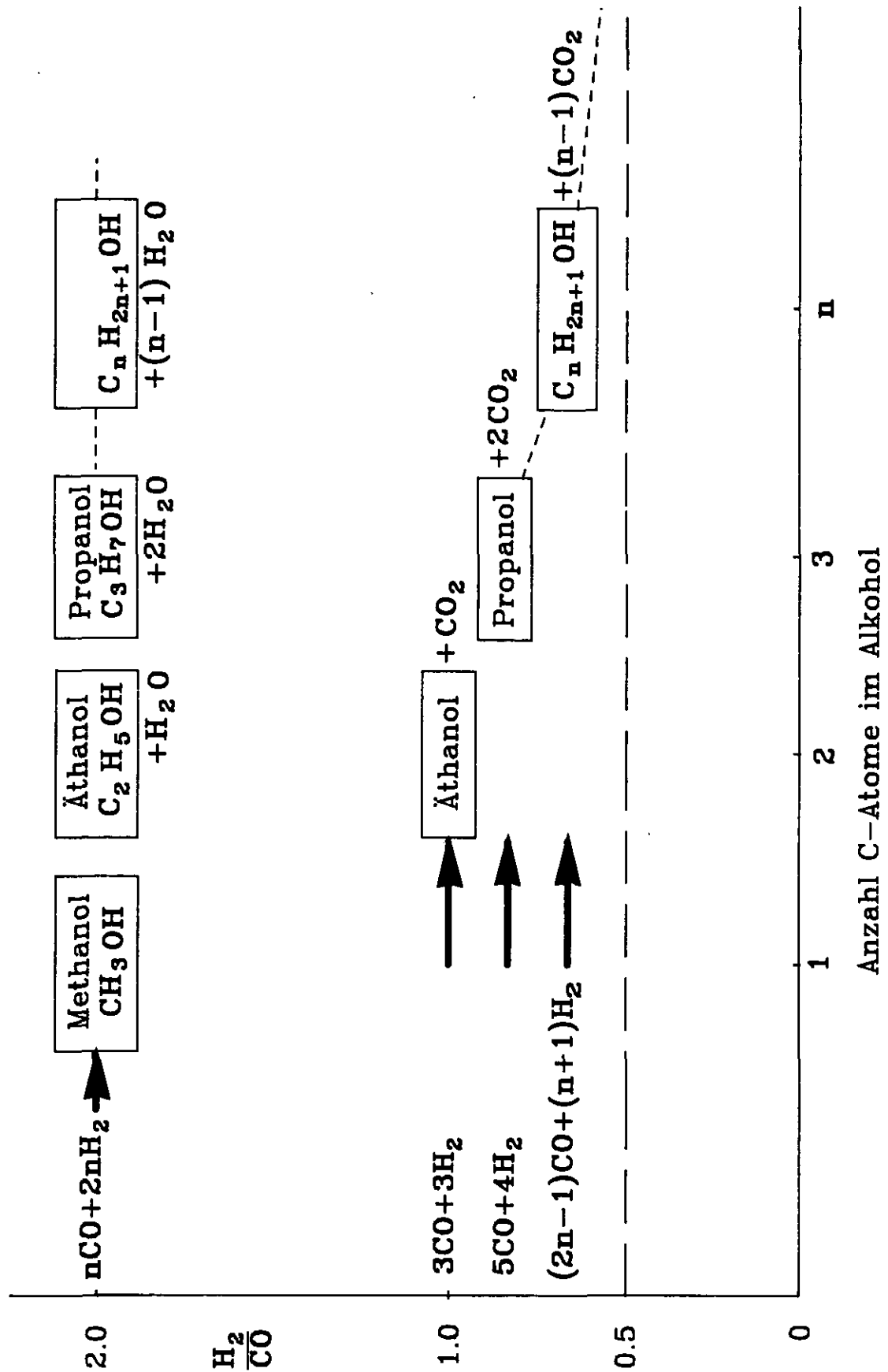


Bild 3: Stöchiometrie der Alkoholbildung aus  $\text{H}_2$ - $\text{CO}$ -Gemischen

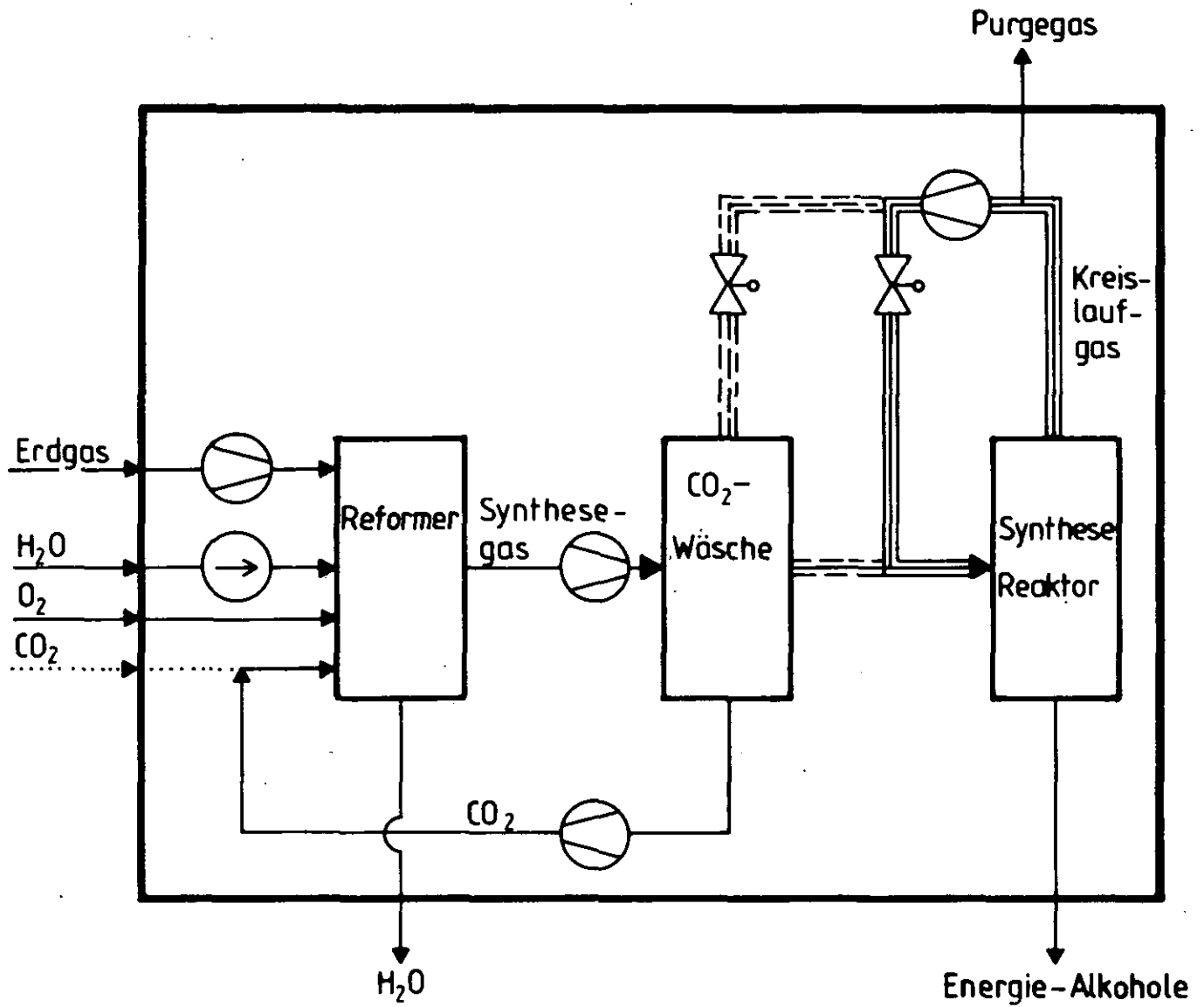


Bild 4: Fließbild der Pilotanlage zur Darstellung von Alkoholen

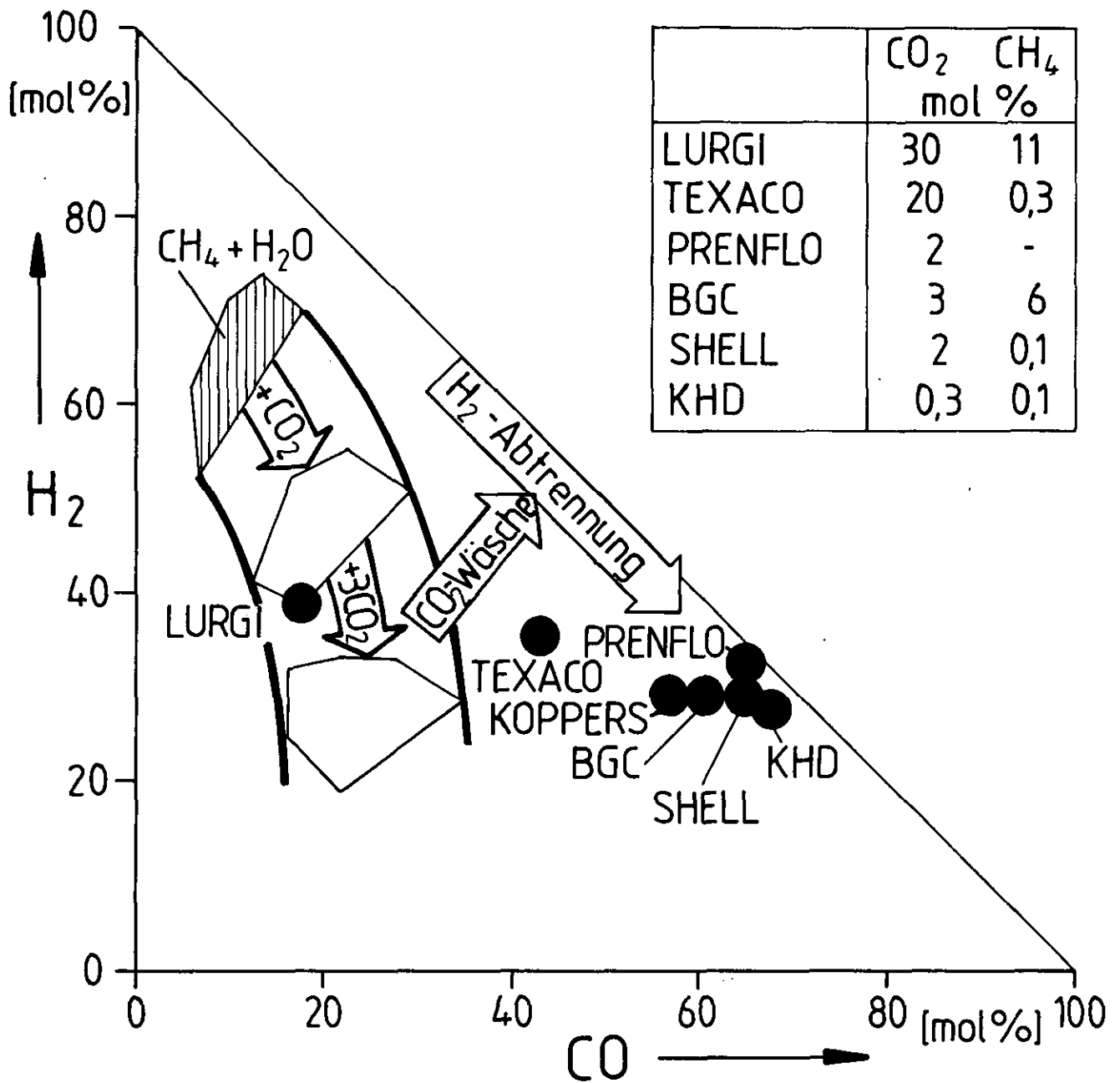


Bild 5: Simulation von Roh-Synthesegasen der Kohle-  
vergasung mit EVA I

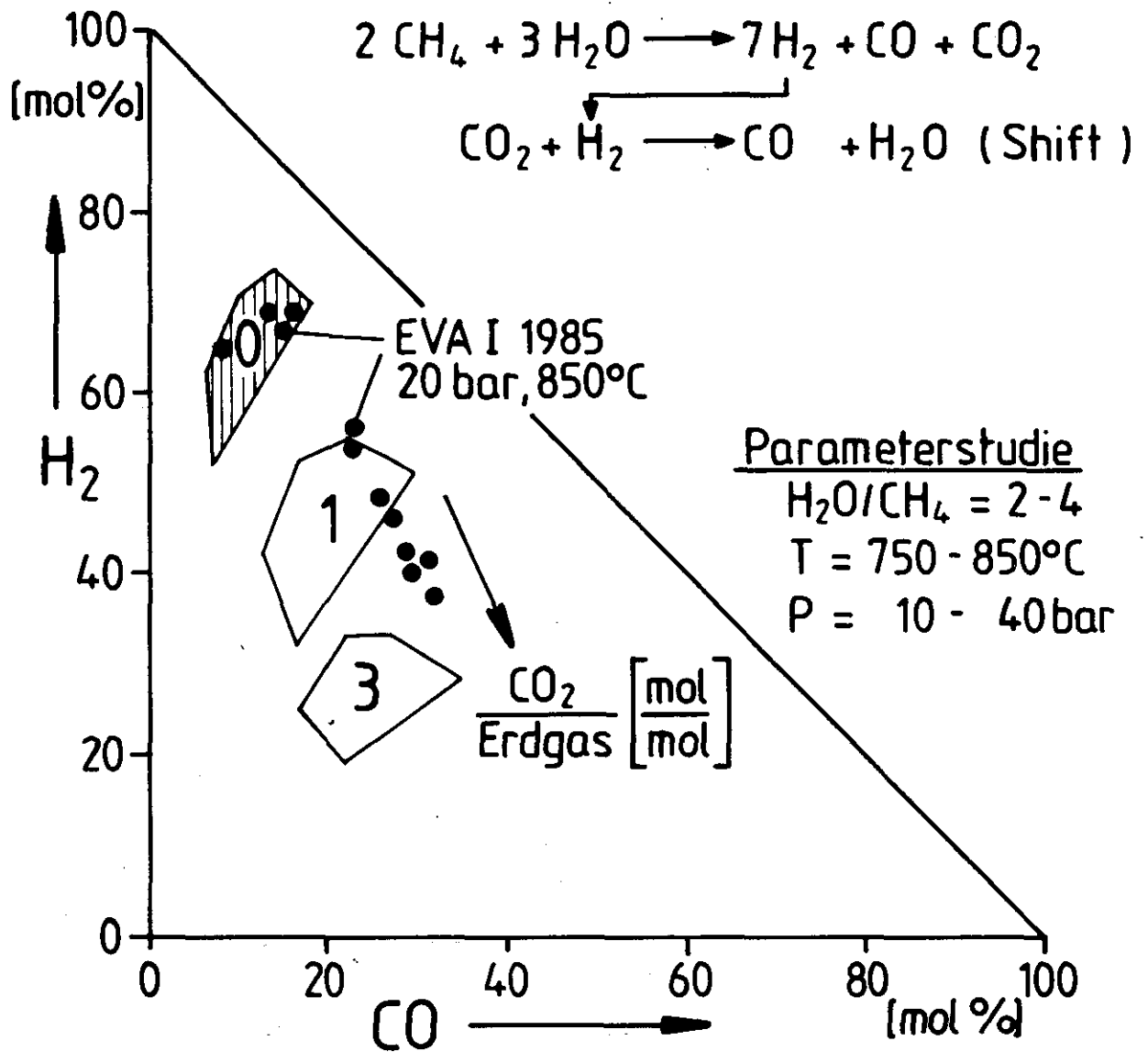


Bild 6: Synthesegase bei der Reformierung von Erdgas mit  $\text{H}_2\text{O}$  und  $\text{CO}_2$



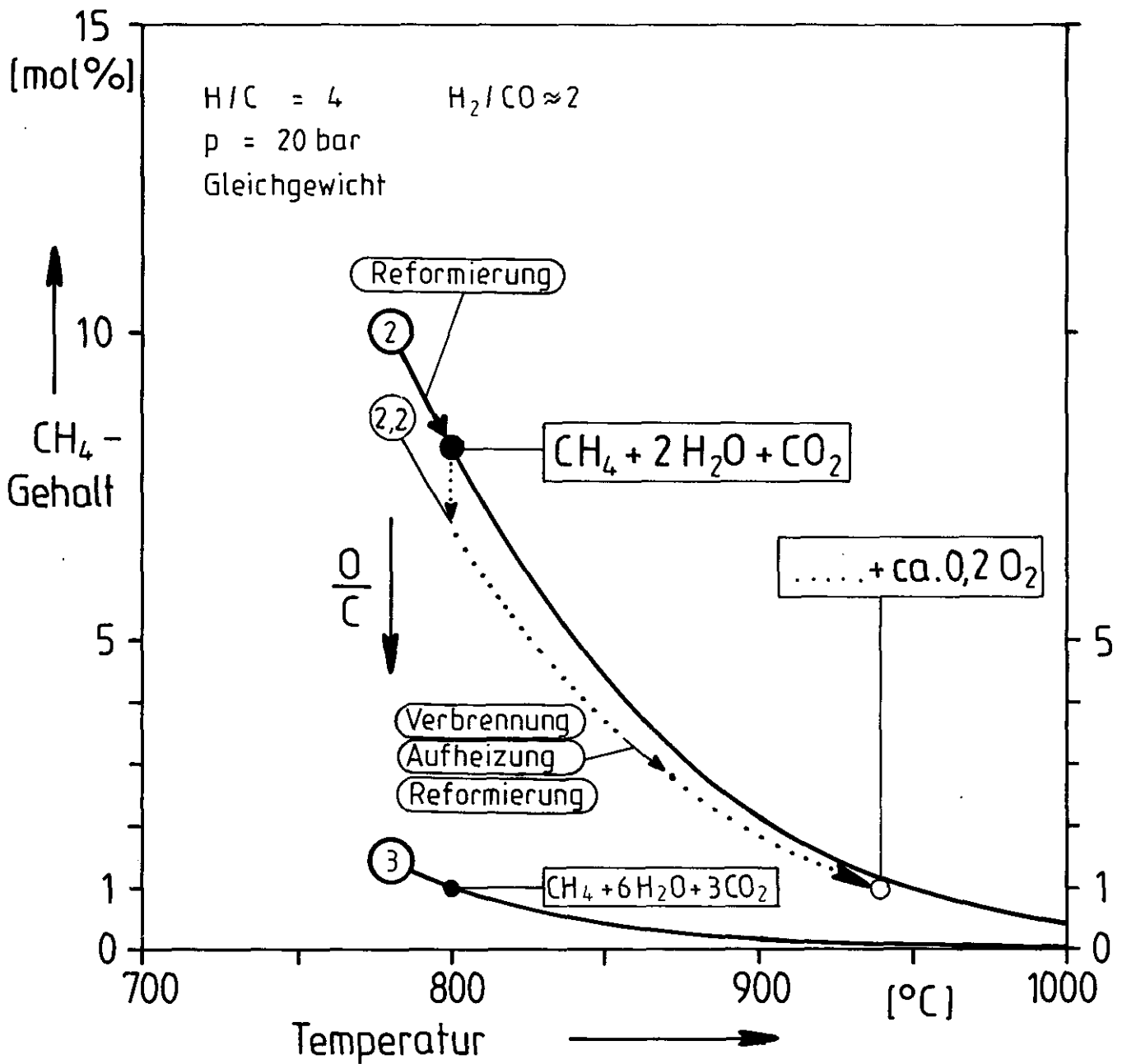


Bild 7: Verminderung des Rest-CH<sub>4</sub>-Gehaltes durch  
 autotherme Schlußreformierung

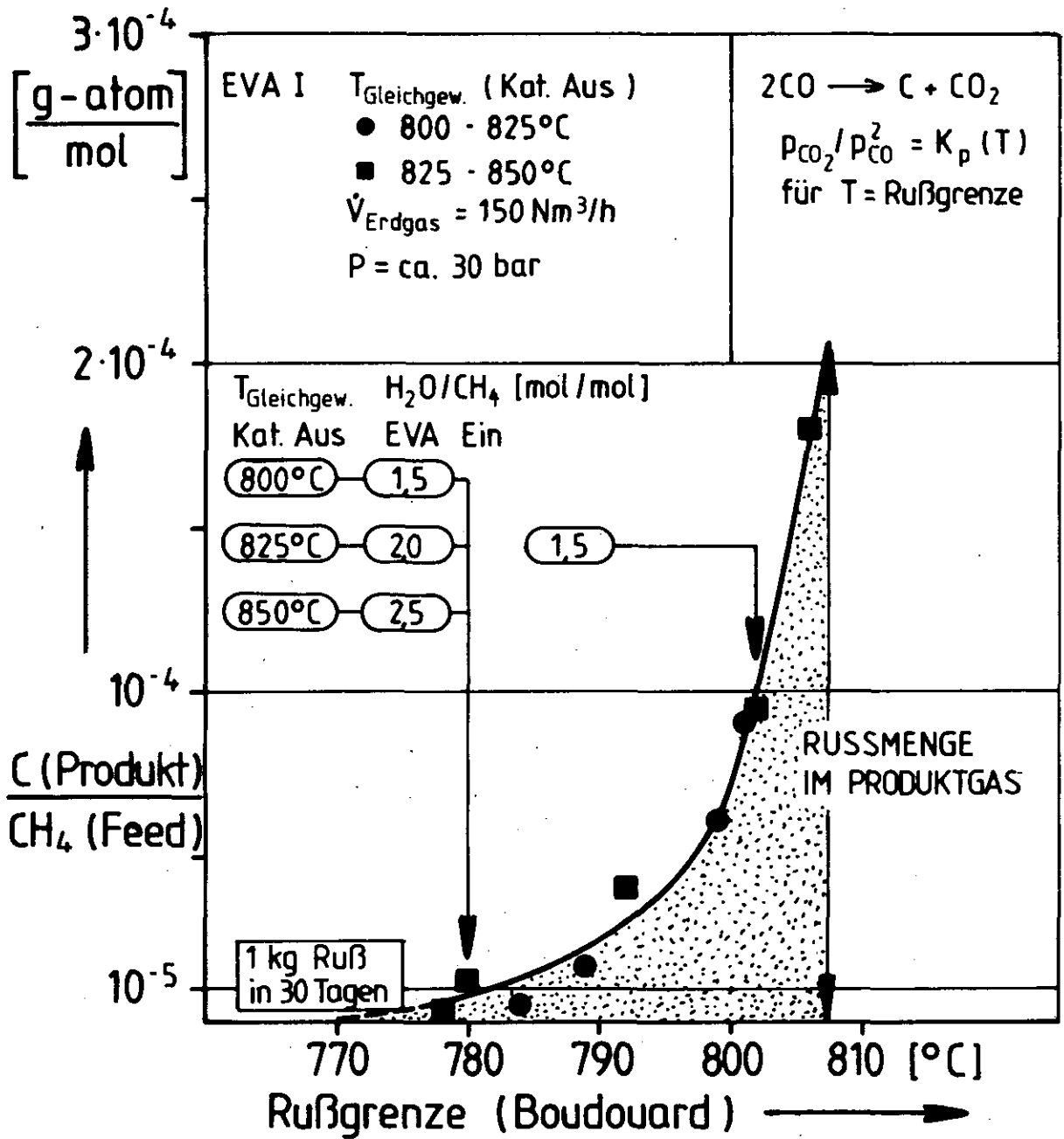


Bild 8: Einfluß der Temperatur, bei der die Boudouard-Rußgrenze unterschritten wird, auf die Rußbildung in der inneren Rückführung

## Von Synthesegasen zu Energiealkoholen \*)

B. Höhle, H. Dötsch, K. Hammeke

### Das Energieversorgungsproblem

Mit den Ölschocks von 1973 und 1979 wurde der Begriff Energieversorgungsproblem geprägt und in den Folgejahren heftig diskutiert. Im Mittelpunkt stand stets die Erschöpfbarkeit der Vorräte an fossilen Primärenergieträgern, insbesondere an Erdöl und Erdgas /1/.

Heute besteht Einvernehmen darüber, daß die Ressourcen und auch die Reserven der fossilen Primärenergieträger ausreichend groß sind, um noch mehrere Jahrzehnte die Nachfrage sicher befriedigen zu können. Fachleute weisen aber auch darauf hin, daß die leicht zugänglichen Reserven qualitativ hochwertiger Rohstoffe schnell zurückgehen: Man wird zunehmend Primärenergieträger von schlechterer Qualität mit größerer Belastung durch Schadstoffe nutzen müssen /2/.

Statt fester Energieträger dominieren heute flüssige und gasförmige Energieträger. In Zukunft müssen neue Strategien und Systeme angeboten werden, die den aktuellen Gegebenheiten auf dem Energiemarkt gerecht werden. Insbesondere müssen die zu entwickelnden Strategien den zukünftigen Anforderungen der Weltbevölkerung Rechnung tragen; mittelfristig bedeutet dies, daß flüssige Energieträger in zunehmenden Mengen bereitzustellen sind, und dabei die Aspekte einer minimalen Umweltbelastung beachtet werden.

Das Institut für Reaktorbauelemente der Kernforschungsanlage Jülich GmbH (KFA) schlägt als additiven Lösungsweg zur heutigen Energieversorgungsstruktur die Herstellung und Nutzung von Energiealkoholen vor /2,3/.

### Energie-Alkohole - flüssige Sekundärenergieträger

Flüssige Sekundärenergieträger sind auch in Zukunft sowohl auf dem Transportsektor als auch bei der Wärmeerzeugung im Bereich der Haus- und Industriewärme dort unentbehrlich, wo eine leitungsgebundene Energieversorgung nicht möglich oder unwirtschaftlich ist. Synthetische flüssige Sekundärenergieträger gewinnen dabei zunehmend an Bedeutung. Dies gilt sowohl für die

\*) auszugsweise veröffentlicht im Handelsblatt 104 vom 1.06.1988

Verbesserung der Qualität konventioneller flüssiger Brennstoffe als auch für einen möglichst wirtschaftlichen Transport von Energie. Die Untersuchung des Potentials von Energie-Alkoholen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit ihrer Herstellung und ihrer Umweltfreundlichkeit ist das Ziel eines KFA-Programms, das anlässlich des 60. Geburtstages des Instituts-Direktors Prof. Dr. C.B. von der Decken und des 30-jährigen Bestehens des von ihm geleiteten Instituts für Reaktorbauelemente (IRB) in der Kernforschungsanlage Jülich vorgestellt wurde.

Verschiedene Wege sind möglich, Energie-Alkohole herzustellen. Der kommerzielle Weg führt heute zu 70 % über die Erdgas-Reformierung zum Synthesegas ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ), das anschließend in der Niederdruck-Synthese (50 - 100 bar) in Methanol umgewandelt wird (Bild 1).

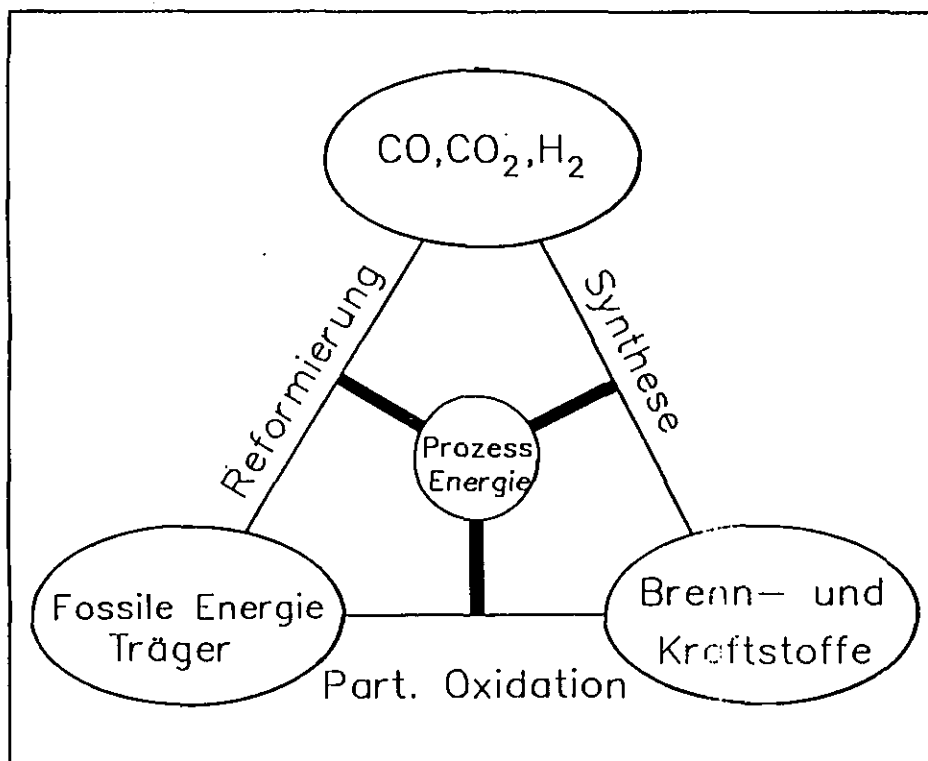


Bild 1: Integriertes Energie-System

Herstellung von flüssigen Energieträgern im IRB

Auch der Weg von einem festen Primärenergieträger (Kohle) zum flüssigen Sekundärenergieträger Methanol ist möglich; allerdings ist der thermische Wirkungsgrad vergleichsweise so schlecht, daß bei Anwendung dieses Verfahrens die doppelte  $\text{CO}_2$ -Emission für die Herstellung und Verbrennung von Methanol anfällt.

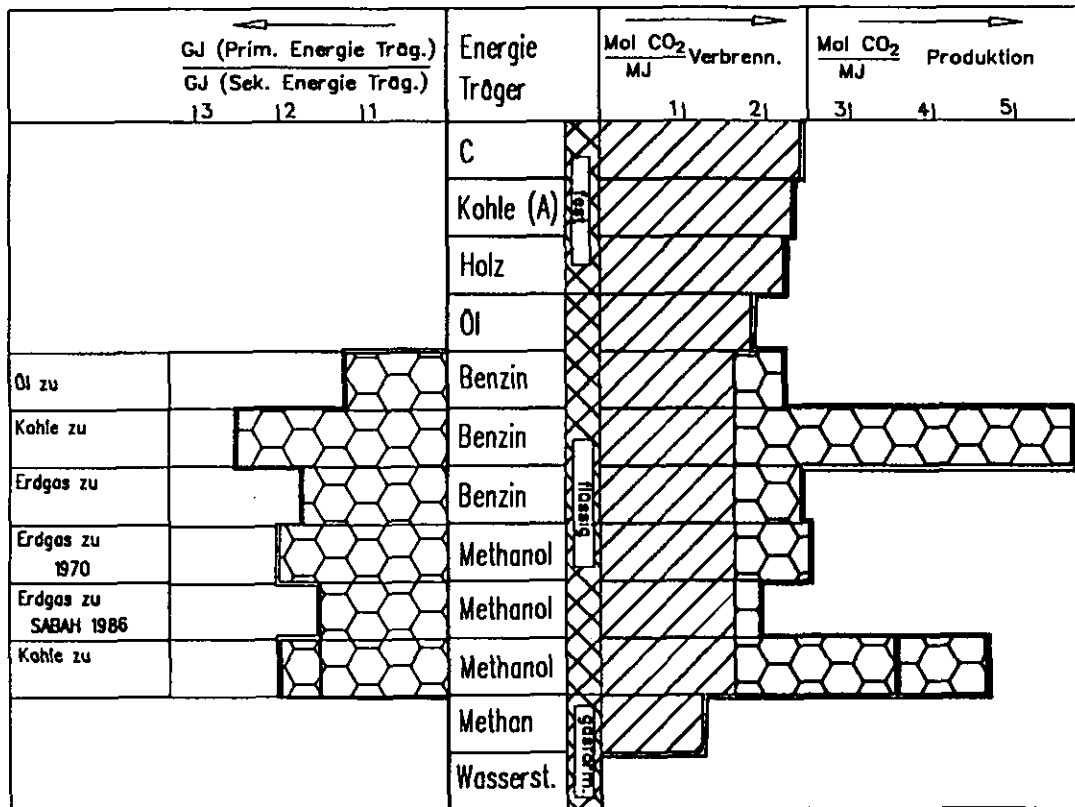


Bild 2: Endenergieträger bei steigendem H/C-Verhältnis - Angaben zum thermischen Wirkungsgrad in GJ/GJ (bezogen auf H<sub>2</sub>) und zur CO<sub>2</sub>-Freisetzung /4,5/

Neben diesem klassischen Verfahren zur Methanolerzeugung (Erdgas zu Methanol) wird heute auch an Verfahren gearbeitet, Kohlendioxid und Wasserstoff über die Retrokonvertierung in ein Synthesegas und dieses anschließend in Methanol umzuwandeln. Dieser Weg von Kohlendioxid (z.B. aus dem Rauchgas) und Wasserstoff (z.B. aus der Elektrolyse) zum Energie-Alkohol ist noch attraktiver, wenn sich die Herstellung solcher Alkohole unmittelbar in einem Syntheseschritt realisieren ließe. Für Energiesysteme in der Übergangsphase zur Wasserstoffgesellschaft besteht somit über die Einkopplung des CO<sub>2</sub>-Moleküls in das Wasserstoffmolekül die Möglichkeit einer "Wasserstoffverflüssigung" in Form der Methanolerzeugung.

Ein anderer Weg zur Herstellung von Energie-Alkoholen besteht in der direkten Umwandlung von Methan (Erdgas) zu Alkohol über die partielle Oxidation. Dieser Weg wird dann von Bedeutung sein, wenn sich der Primärenergie-markt nach dem Jahre 2000 immer mehr auf dem Erdgas stützt und Energieversorgungssysteme wie Chemikalienerzeugungssysteme diesen gasförmigen Energieträger einbeziehen müssen (Bild 3). An allen Verfahren wird weltweit gearbeitet, insbesondere an den herkömmlichen Verfahren zur Methanolherstel-

lung, bei denen von der Hochdrucksynthese ausgehend heute bei der Niederdrucksynthese thermische Wirkungsgrade von 65 % (unterer Heizwert) erreicht werden können. (Das theoretische Optimum beträgt 80 % für die Umwandlung von Erdgas zu Methanol).

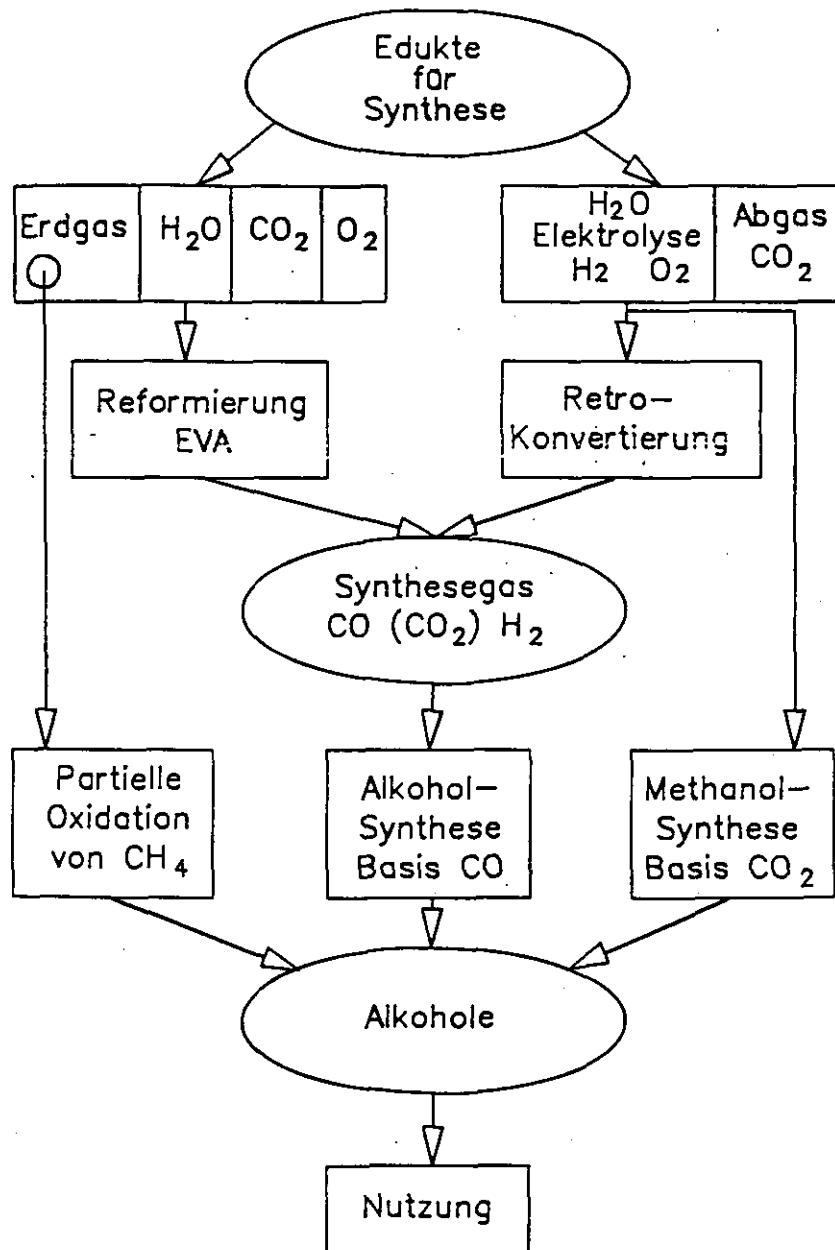


Bild 3: Energiealkohol-Herstellung auf verschiedenen Wegen

Auf dem Kraftstoff- und Wärmemarkt stellen die Energie-Alkohole aussichtsreiche flüssige, synthetische Energieträger dar. Ihr Umweltpotential insbesondere im Vergleich zu Benzin, Diesel und Heizöl ist hoch: saubere Verbrennung, schneller biologischer Abbau, Wasserlöslichkeit, geringe Langzeitauswirkungen auf Luft und Boden. Sowohl auf der Erzeuger- als auch auf der Verbraucherseite stehen Techniken für eine Markteinführung zur Verfügung. Weiterführende Arbeiten für beide Seiten sind aufgrund der in Zukunft veränderten Primärenergie- (schadstoffbelastete Primärenergieträger) und Umwelt-Situation sowie der zukünftigen Situation auf dem Verbrauchermarkt notwendig und werden heute weltweit durchgeführt.

### Synthesegaserzeugung

Synthesegas kann aus Kohlenstoff und Kohlenwasserstoffverbindungen wie Erdgas, Öl, Kohle, Ölschiefer und Teersand nach verschiedenen Verfahren erzeugt werden. Der größte Teil der heutigen Synthesegase wird durch die Reformierung von Erdgas erzeugt /3/.

Die durch unterschiedliche Verfahren - aufgrund verschiedener Primärenergieträger - erzeugbaren Synthesegase weisen deutliche Unterschiede im  $H_2/CO$ -Verhältnis und in den Begleitkomponenten  $CO_2$  und  $CH_4$  auf: Beginnend mit der Reformierung von Erdgas und Wasserdampf fällt das  $H_2/CO$ -Verhältnis des gewonnenen Synthesegases von ca. 5 bis auf ca. 0,5 bei der Kohlevergasung; die begleitenden Gaskomponenten  $CO_2$ ,  $CH_4$  und  $N_2$  fallen bei den verschiedenen Verfahren in unterschiedlichen Mengen an.

Diese Rohsynthesegase müssen, wie auch Deponiegas und Kokereigas, für die weitere Nutzung teilweise nachbehandelt werden. Das für die anschließende Synthese erforderliche  $H_2/CO$ -Verhältnis ist gegebenenfalls durch  $CO$ -Konvertierung oder  $H_2$ -Abtrennung einzustellen, während die für das katalytische Reaktionssystem schädlichen Gaskomponenten (Schwefel-, Arsen-, Phosphor- und Halogenverbindungen) abgetrennt werden müssen. Insgesamt bieten die Minimierung und kostengünstige Auslegung aller Verfahrensschritte gute Möglichkeiten, die Wirtschaftlichkeit des Umwandlungsprozesses auf dem Weg vom Energierohstoff zum gewünschten Produkt zu verbessern.

Für die Simulation der unterschiedlichen Rohsynthesegase steht im IRB die heliumbeheizte  $CH_4-H_2O-CO_2$ -Reformierungsanlage EVA I (Bau 1972) mit einer Rohsynthesegaskapazität von  $600 \text{ Nm}^3/\text{h}$  zur Verfügung. Der Einsatz eines heliumbeheizten Reaktionsrohres für das heterogen katalysierte Reaktionssy-

stem der Reformierung unter Wärmeverbrauch läßt auch die Möglichkeit der Einkopplung nuklear (Hochtemperatur-Kernreaktor) erzeugter Wärme in chemische Reaktionsprozesse erkennen. Die Konditionierung der Rohsynthesegase erfolgt durch eine  $\text{CO}_2$ -Wäsche (Bau 1988) und eine  $\text{H}_2$ -Permeationstrennung (in Vorbereitung), wodurch die verschiedenen Einflußgrößen im Hinblick auf die Produktsynthese ( $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ , Druck, Temperatur, Katalyse) sorgfältig im Experiment untersucht werden können.

### Synthese flüssiger Energieträger

Synthesegase können durch eine Vielzahl von Verfahren in höherwertige Kohlenstoff-, Wasserstoff- und Sauerstoffverbindungen (C-H-O) umgewandelt werden. Entscheidend für die Wahl des Syntheseverfahrens und damit für den gesamten Umwandlungsprozeß ist die gewünschte Zusammensetzung des Produkts /3/.

Während bei den Synthese von Methan und Methanol



infolge jeweils selektiv geführter katalytischer Reaktionen die fast reinen Produkte Methan oder Methanol erzeugt werden, muß bei der Synthese von langkettigen  $\text{C}_n$ -Molekülen, z.B. bei höheren Alkoholen, eine zunehmende Zahl verschiedener Nebenprodukte in Kauf genommen werden. Die Ursachen hierfür sind im Mechanismus der Produktentstehung zu suchen. Ein breites Produktspektrum gibt es bei der Fischer-Tropsch-Synthese. Für die gezielte und ausschließliche Herstellung synthetischer flüssiger Energieträger nimmt die Methanolsynthese und auch die Synthese von Gemischen aus Methanol und höheren Alkoholen mit ihrer hohen Selektivität und dem damit eingegrenzten Produktspektrum eine herausragende Stellung ein; wobei die niederen Alkohole bereits bei Umgebungstemperatur in flüssiger Form vorliegen.

Die im Bild 4 und Bild 5 dargestellte Anlage zur Synthese von Alkoholen ist von der Firma LURGI für eine Tagesleistung von etwa 4000 Liter Rohmethanol ausgelegt und aufgebaut worden (1986). Die Reformieranlage EVA-I stellt dafür stündlich ungefähr  $600 \text{ Nm}^3$  Synthesegas bereit, das von einem Synthesegaskompressor von 20 bar auf maximal 160 bar komprimiert werden kann (Bild 5). Das Ziel der Untersuchungen mit der Pilotanlage besteht darin, das Po-



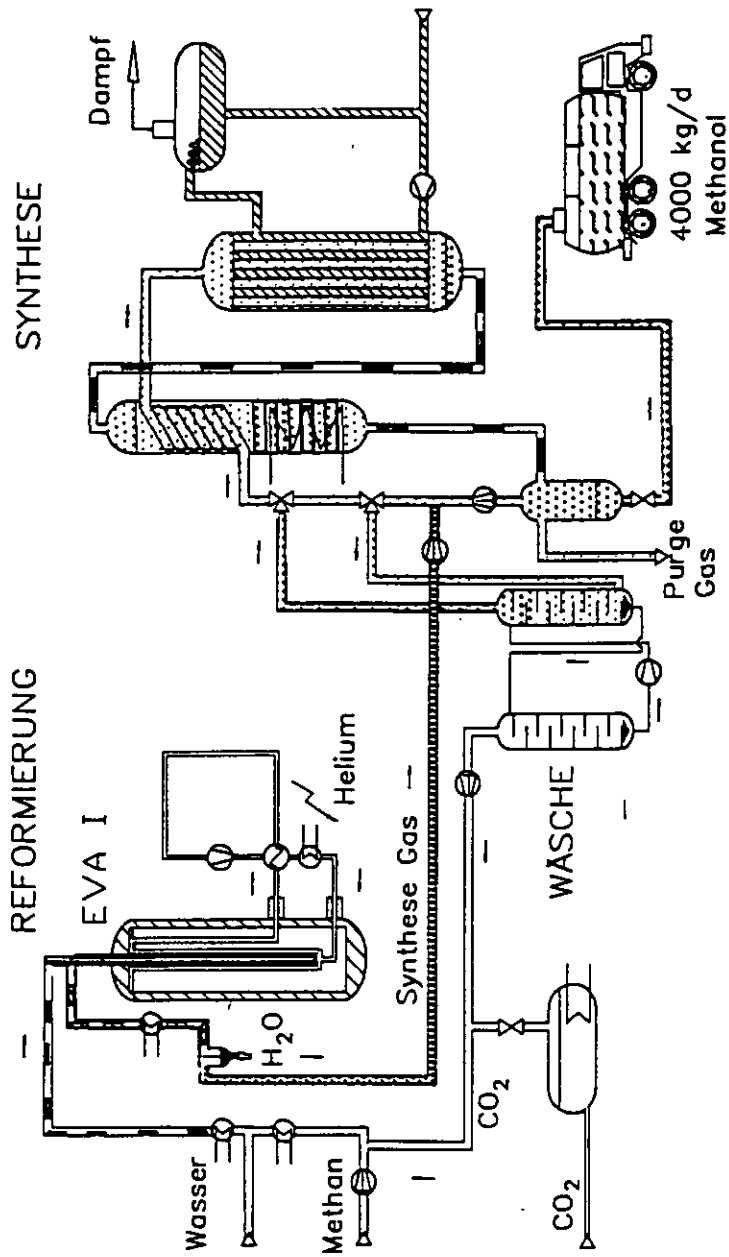


Bild 4: Anlage zur Synthese von Energiealkoholen (4 t/a) auf der Basis von Synthesegas ( $600 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ) aus einer Methan-Wasserdampf- $\text{CO}_2$ -Reformierung mit nachgeschalteter Gasaufbereitung

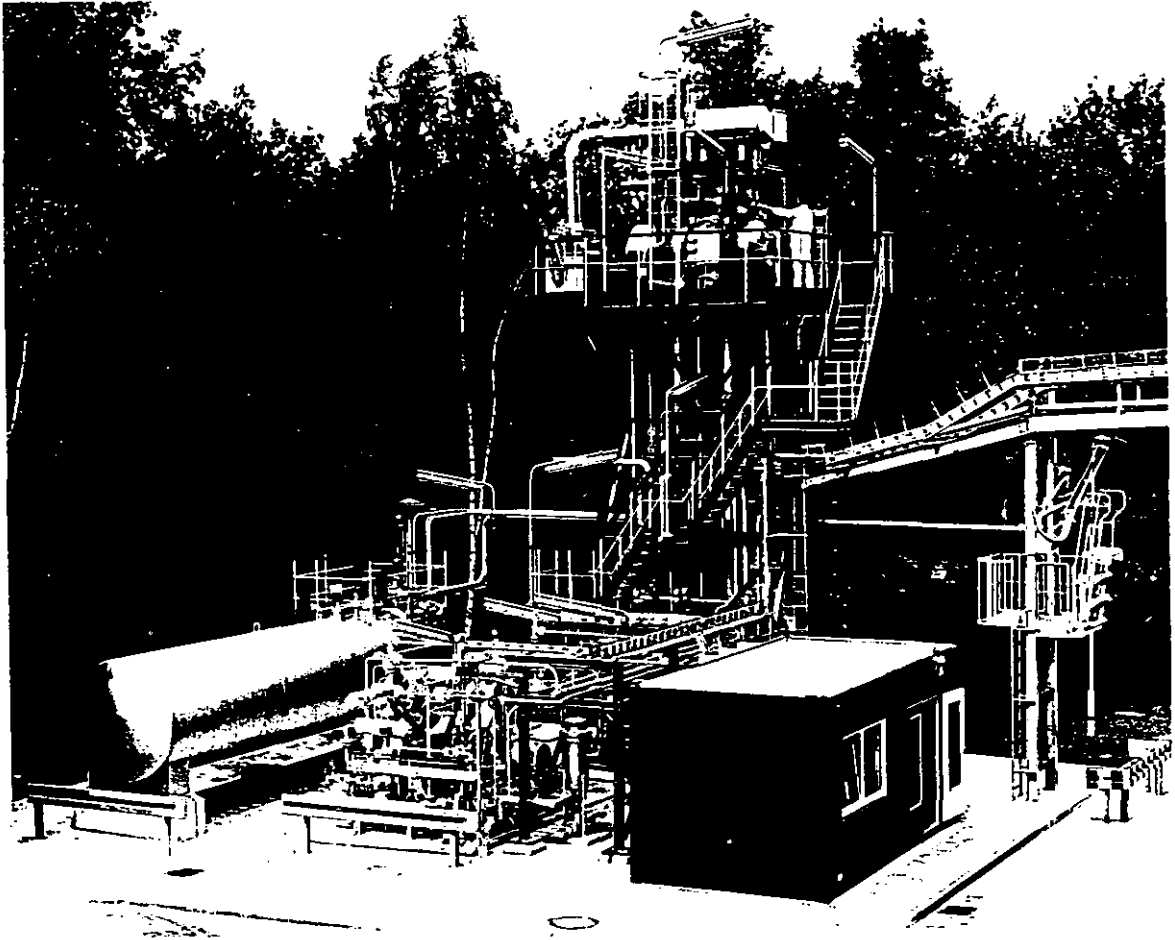


Bild 5:

Pilot-Anlage für die Entwicklung der Alkoholsynthese im IRB der KFA Jülich  
(Kapazität: 4 t/Tag)

tential zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Methanolherstellungsverfahren zu bestimmen und neue Verfahren zur Methanol- und Alkoholgemischproduktion für den Energiemarkt, insbesondere unter Berücksichtigung  $\text{CO}_2$ -reicher Synthesegase, zu entwickeln.

Aufbauend auf die bekannten Verfahren zur Methanolsynthese werden im Labor modifizierte Niedertemperaturkatalysatoren zur Synthese von Alkoholgemischen, die z.Zt. schon als oktanzahlerhöhende Kraftstoffzusätze von besonderem Interesse sind, untersucht. Hierbei handelt es sich um Katalysatorsysteme, die auf einer Cu/Zn-Basis bzw. Cu/Co-Basis aufgebaut sind und zu verschiedenen Produktzusammensetzungen führen. Insbesondere wird im Labor der Einfluß verfahrenstechnischer Parameter auf die Aktivität, Selektivität und Stabilität dieser Katalysatoren untersucht. Die bei den Versuchen eingesetzten Synthesegase erstrecken sich über die volle Bandbreite vom wasserstoffarmen Kohlegas bis hin zum wasserstoffreichen Gas, wie es bei der Methan/Dampfreformierung entsteht. In dieser Bandbreite liegen beispielsweise auch die Synthesegase, die bei der Pyrolyse von organischen Abfällen entstehen. Begleitend werden im Labormaßstab neue Wege der partiellen Oxidation verfolgt, wobei die direkte Aktivierung des Methanmoleküls im Vordergrund steht.

#### Nutzung von Energie-Alkoholen

Als Brennstoff haben Energie-Alkohole, insbesondere Methanol, in nur wenigen Verbrennungsanlagen unterschiedlicher Größe Anwendung gefunden. Hier liegt ihr Potential in der Verbesserung der Umwelt-Situation. In der Literatur wird darauf hingewiesen, daß bei Verwendung von Methanol geringere  $\text{CO}$ - und  $\text{NO}_x$ -Werte im Abgas gemessen werden, als bei der Verbrennung von Heizöl. Im IRB sind die Arbeiten darauf ausgerichtet, das Umweltpotential der Energie-Alkohole quantitativ nachzuweisen und geeignete Brennersysteme zu entwickeln /3/.

Der Einsatz von alternativen Kraftstoffen für den Straßenverkehr ist aus Gründen der zu erwartenden Limitierung der Schadstoffemissionen und der zukünftigen Energiekostenentwicklung von großer Bedeutung. Die für den Einsatz in Fahrzeugmotoren am besten geeigneten alternativen Kraftstoffe sind derzeit die Alkohole Methanol und Ethanol. Insgesamt läßt sich feststellen, daß sowohl Methanol als auch Ethanol physikalische und chemische Eigenschaften aufweisen, die bei Einsatz im Verbrennungsmotor Vorteile, aber auch Probleme erkennen lassen. Eine Anpassung der Motoren (Ottomotor oder

Dieselmotor) sowie der Kraftstoffe erweist sich als notwendig.

In der BRD werden dem Kraftstoff Benzin (Verbrauch: 24 Mio t/a) derzeit aus wirtschaftlichen Gründen 0.4 Mio t/a Methanol plus 0.3 Mio t/a Tertiärbutyläther (TBA) als Lösungsvermittler zugesetzt. Der westeuropäische Bedarf an einem Benzin-Blend mit 3 % Methanol könnte bei einem Verbrauch von 100 Mio t/a infolge der heute verfügbaren Methanol-Überschuß-Produktionskapazität weltweit gedeckt werden. Erst beim Übergang auf Kraftfahrzeugkonzepte mit überwiegendem Alkoholanteil im Kraftstoff (siehe u.a. BMFT-Forschungsprogramm M100) ist weltweit eine deutliche Erweiterung der Energie-Alkohol-Produktion zu erwarten.

Energie-Alkohole als Gemische von Methanol mit höheren Alkoholen können als Komponente in Mischkraftstoffen in dem Maße eingesetzt werden, wie die im Energie-Alkohol-Gemisch enthaltenen höheren Alkohole als Lösungsvermittler erforderlich sind. Energie-Alkohol-Gemische als ausschließliche Kraftstoffkomponente sind insbesondere für den Einsatz in Dieselmotoren geeignet. Hierbei sind infolge des Anteils an höheren Alkoholen im Vergleich zum Motorbetrieb mit Reinmethanol bzw. M100 eine Reihe von Vorteilen zu erwarten: Das IRB läßt an der RWTH Aachen bei Prof. Pischinger die erzeugten Energie-Alkohole in Dieselmotoren im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsprogramms im Hinblick auf die Motoren-Optimierung einerseits und das Umweltpotential andererseits untersuchen /3/.

Bezüglich der Preissituation ist festzustellen, daß bei der Umwandlung von Erdgas in Methanol schon heute ein thermischer Wirkungsgrad von 65 % (LURGI - SABAH) erreicht wird; die dabei anfallende niedrige Gesamtemission an  $\text{CO}_2$  ist vergleichbar mit der  $\text{CO}_2$ -Emission, die bei Herstellung und Verbrennung von Benzin auf der Basis von Öl entsteht. Der entsprechende Preisvergleich unter Zugrundelegung eines Erdölpreises von 1987 (15 \$/b) zeigt, daß Energie-Alkohole (hier Methanol aus Erdgas) auf dem Energiemarkt für Treibstoffe heute in Konkurrenz zum Benzin anzubieten sind, wenn der Preis für Erdgas bei  $0,12 \text{ DM/m}^3$  (Weltmarkt) liegt.

### Zusammenfassung und Ausblick

Unsere Gesellschaft muß ihre Energieversorgungssysteme auf die sich ändernden Strukturen auf dem Primärenergiemarkt und beim Verbraucher unter besonderer Berücksichtigung des Anspruchs auf eine saubere Umwelt einstellen. Das Institut für Reaktorbauelemente der Kernforschungsanlage Jülich untersucht in diesem Zusammenhang gemeinsam mit der Programmgruppe Systemforschung und technologische Entwicklung die Möglichkeiten der Integration von Energie-Alkoholen in diese Energieversorgungssysteme. Insbesondere werden spezielle Fragestellungen vom Primärenergieträger bis hin zur Logistik untersucht, technische Daten experimentell erarbeitet und Lösungsmöglichkeiten im Hinblick auf die Ansprüche unserer Gesellschaft von morgen aufgezeigt.

Literatur:

- /1/ Häfele, W./ Martinsen, D./ Walbeck, M./ (1987)  
The Concept of Novel Horizontally Integrated Energy System-Ways to  
Reduce CO<sub>2</sub>-Emission  
(Kernforschungsanlage Jülich GmbH, Jülich)
  
- /2/ Beljaev, L.S./ Kaganovic, B.M./ Krutow, A.N./ Filippov, S.P./  
(Irkutsk/UdSSR)  
Martinsen, D./ Müller, M./ Wagner, H.J./ Walbeck, M./ (Jülich, KFA/STE)  
(1986)  
Ways of Transition to Clean Energy Use: Two Methodological Approaches,  
(Laxenburg/Wien: IIASA-Bericht 64.20.1)
  
- /3/ von der Decken, C.B. et al. (1987)  
Energie-Alkohole  
(Kernforschungsanlage Jülich GmbH, Jül-Spez-392)
  
- /4/ Hiller, H. (1987)  
Persönliche Mitteilungen
  
- /5/ Höhle, B./von der Decken, C.B./Dötsch, H./Fedders, H. (1987)  
Methane Reforming, Methanation, and Alcohol Synthesis - Technical  
Elements of IES Joint/ICIES/IIASA Task Force Meeting  
Integrated Energy Systems (IES)  
July 13-15, 1987  
A2361 Laxenburg

## Energiealkohole als Brennstoff

P. Bröckerhoff

### Einleitung

Ziel zahlreicher Arbeiten auf dem Gebiet der Verbrennungstechnik ist die Entwicklung von Verfahren, die Menge der entstehenden unerwünschten Verbrennungsprodukte zu verringern bzw. ihre Entstehung zu vermeiden. Die Möglichkeiten zur Emissionsminderung bestehen in primären und sekundären Maßnahmen. Zur ersten Gruppe gehören das Reinigen der Energieträger vor der Umwandlung bzw. die Verwendung möglichst reiner Brennstoffe, ihr rationaler Einsatz, konstruktive Maßnahmen zur Gestaltung der Brennräume und die Zugabe von Bindemitteln. Reichen diese Schritte nicht aus, ist auf sekundäre zurückzugreifen. Hierbei werden die Rauchgase z.B. mittels Entstaubungs-, Entschwefelungs- und Entstickungsanlagen gereinigt. Diese Maßnahmen sind allerdings nur mit großem finanziellen Aufwand zu realisieren. Daher scheint es lohnend, sich mit einer Primärmaßnahme, hier mit der Verwendung eines sauberen Energieträgers, auseinanderzusetzen. Als Brennstoffe zur Wärmeerzeugung könnten z.B. Energiealkohole, also Methanol und Gemische aus Methanol mit höheren Alkoholen, in Frage kommen. Ihr Einsatz zur Wärmeerzeugung ist bisher nur wenig und nach unserer Meinung auch nur unzureichend untersucht worden.

In Abbildung 1 sind einige Brennstoffdaten des Methanols im Vergleich zu Heizöl EL und Methan, das stellvertretend für Erdgas steht, aufgeführt. Die adiabate Verbrennungstemperatur liegt um fast 150 K bzw. 100 K unter den Werten der Vergleichsstoffe. Dies ist nach Auffassung einiger Autoren der Grund für geringere  $\text{NO}_x$ -Werte, /1/. Heiz- und Brennwert sind etwa um den Faktor 2 und mehr kleiner als bei Heizöl und Methan. Dieser Nachteil fällt bei den stationären Anlagen, um die es im Fall der Verbrennung zum Zwecke

der Wärmeerzeugung ja geht, nicht so sehr ins Gewicht wie bei den mit Methanol betriebenen Fahrzeugen. Außerdem lassen sich die Heiz- und Brennwertdifferenzen durch Zumischung höherer Alkohole vermindern.

### Literaturübersicht und eigene Arbeiten

#### Herkömmliche Verbrennung

Bisher haben die Energiealkohole und hier speziell Methanol lediglich in einigen Anlagen Verwendung gefunden. Abbildung 2 enthält die verwendete Einrichtung, Betreiber, Leistung und die zum Einsatz gekommenen Brennstoffe. Weitere Hinweise und Literaturangaben hierzu finden sich in /1/. Wie man erkennt, wurden die meisten Versuche in Nordamerika durchgeführt. Europa ist lediglich mit Arbeiten in Italien und der Bundesrepublik Deutschland vertreten. Die Versuche wurden sowohl in kleinen Prüfständen an Forschungseinrichtungen als auch in Kraftwerken an Dampfkesseln mit Leistungen von bis zu 110.000 kW durchgeführt. In der Mehrzahl der Fälle wurden neben Methanol auch weitere Brennstoffe zum Vergleich eingesetzt. Der japanische Raumheizofen gestattete aufgrund seiner einfachen Konstruktion auch den Einsatz von Methanol plus Wasser bzw. plus Kerosin. Ein Gemisch aus Methanol und Isopropanol wurde in North Carolina verwandt. In der letzten Reihe ist eine Untersuchung in Brasilien aufgeführt, bei der neben fuel oil auch Ethanol eingesetzt wurde. Die angegebene Kesselleistung von 110.000 kW konnte allerdings nur über einen Zeitraum von einer Stunde gefahren werden.

Aus den erwähnten Untersuchungen geht hervor, daß sich Methanol durchaus umweltfreundlicher als z.B. Heizöl verbrennen läßt. Meist wurden nur geringe Mengen an CO und  $\text{NO}_x$  im Abgas gefunden. Feste Rückstände, z.B. Ruß, traten nicht auf. Diese Ergebnisse sind überraschend, wenn man bedenkt, daß alle Versuche an herkömmlichen Systemen durchgeführt wurden. Spezielle Methanol- bzw. Alkoholbrenner und darauf abgestimmte Kessel gab es nicht. Hier sollen die Arbeiten der KFA ansetzen. Das Ziel ist, das Umweltpotential der Energiealkohole quantitativ nachzuweisen und, wenn dieser Nachweis gelungen ist, Brennsysteme zu entwickeln.



Der Prüfstand, mit dem Brenner und deren Brennverhalten getestet werden, ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt. Die zu testenden Brenner werden an ein Prüfflammrohr, das den sonst üblichen Kessel ersetzt, angeschlossen. Seine Kapazität ist auf 40 kW begrenzt. Das den Mantel durchströmende Kühlwasser führt den größten Teil der in der Flamme freigesetzten Wärme ab. Die restliche Verbrennungswärme wird mit dem Abgas über den Kamin abgeleitet. Als Grundlage für die Versuche mit Alkoholen werden zunächst Untersuchungen mit Erdgas H und Heizöl EL, die mittels herkömmlicher Brenner verbrannt werden, durchgeführt. Ihre Leistung entspricht in etwa der des Flammrohres. Dann kommt Methanol zum Einsatz. Hierzu sind Umstellungen an der Pumpe und am Flammenüberwachungssystem notwendig. Versuche mit verdampftem und reformiertem Methanol sollen im Anschluß daran durchgeführt werden. Zum Abschluß sind Messungen mit Alkoholmischungen aus der Pilotanlage vorgesehen. Alle diese Versuche haben zum Ziel, bei gleichen Versuchsbedingungen im Flammrohr möglichst normierte Ergebnisse zu gewinnen. Als Kriterium gelten dabei die Analysenwerte im Abgas. Auf die in diesem Bild symbolisch angedeutete Abgasanalytik wird später im Detail eingegangen.

### Strahlungsbrenner

Parallel zu dem zuvor beschriebenen Vorhaben wird ein Strahlungsbrenner entwickelt, der ebenfalls mit Energiealkohol betrieben werden soll. Ein Strahlungsbrenner unterscheidet sich nach Schaedel /2/ vom konventionellen Brenner durch das Fehlen einer sich ausbreitenden Flamme. Der Wärmeübergang, weitgehend infolge Strahlung, wird dadurch hervorgerufen, daß ein Teil der molekularen Schwingungsenergie eines Körpers, seiner Temperatur entsprechend, aussendet. Wenn ein anderer Körper diese Strahlung absorbiert, werden seine Moleküle in Schwingungen versetzt. Um möglichst viel Wärme durch Strahlung zu übertragen, sollte die Wellenlänge des Empfängers mit der des Senders übereinstimmen. Die Strahlungsenergie eines Körpers ist dabei nach Stefan-Boltzmann der vierten Potenz der absoluten Oberflächentemperatur, der Oberfläche und der Strahlungszahl direkt proportional.

Abbildung 4 gibt nach Freitag /3/ eine Übersicht über die verschiedenen Strahlertypen, eingeteilt nach Wellenlängenbereichen und Oberflächentemperaturen. Je nach Wellenlänge unterscheidet man zwischen Hell-, Glüh- und

Dunkelstrahlern. Den Wellenlängenbereich zwischen  $4\text{ }\mu\text{m}$  -  $5\text{ }\mu\text{m}$  deckt der Katalytstrahler ab, der seine Wärme bei Oberflächentemperaturen zwischen  $580\text{ K}$  und  $724\text{ K}$  abgibt. Die genannten Grenztemperaturen wurden entsprechend der im Bild angegebenen Beziehung - Wiensches Verschiebungsgesetz genannt - berechnet. Das Gemeinsame bei den Infrarotstrahlern ist, daß sie Energie zunächst in Wärme umwandeln und feste Körper zur Emission anregen. Die Energieform bei den Hellstrahlern ist der elektrische Strom. Bei den Glüh- und Dunkelstrahlern werden chemische Energieträger benutzt. Während der vergangenen etwa zehn Jahre hat es zur Entwicklung geeigneter gasbetriebener Infrarotbrenner umfangreiche Untersuchungen gegeben, die zu einem marktreifen Produkt der Firma ALZETA/Kalifornien geführt haben, siehe /1/. Die Verbrennung erfolgt bei Temperaturen, die weit unterhalb der Flammentemperatur normaler Brenner liegen. Durch die Verwendung eines Katalysators kann die Reaktionstemperatur weiter herabgesetzt werden. Die Reaktion geschieht in diesen Fällen an oder in der Nähe der Oberfläche ohne eine offene Flamme. Damit läßt sich eine starke  $\text{NO}_x$ -Minderung erzielen. Vorwiegend in der englisch-sprachigen Literatur wird der Begriff "katalytische Verbrennung" auch dann verwandt, wenn die Reaktionstemperaturen zwischen  $1100\text{ K}$  und  $1500\text{ K}$  liegen. Dies ist nach der Festlegung der im Bild angegebenen oberen Grenztemperatur von  $724\text{ K}$  nicht statthaft. Die Übergänge scheinen jedoch fließend zu sein. Im folgenden wird, auch wenn zur Beschleunigung der Reaktion mit Katalysatoren gearbeitet wird, nur der übergeordnete Begriff Strahlungsbrenner verwendet werden.

Der im Institut entwickelte und bereits seit längerem mit Methanol betriebene Strahlungsbrenner ist in Abbildung 5 dargestellt. Das Methanol wird zunächst verdampft und der Verbrennungsluft zugemischt. Dieses Methanoldampf/Luftgemisch durchströmt anschließend einen porösen Katalysatorträger, dessen Aufgabe eine gleichmäßige Gemischverteilung ist. An der mit einer katalytisch wirkenden Substanz belegten äußeren Oberfläche findet die Verbrennung statt, die eine Mischung aus homogener und heterogener Reaktion darstellt. Der Katalysatorträger aus keramischen Fasern oder Festkeramiken hat außer der Gemischverteilung auch die Aufgabe, aufgrund seiner notwendigen niedrigen Wärmeleitfähigkeit ein Zurücklaufen der Reaktionszone in den Innenraum, durch den das Gemisch zuströmt, zu verhindern. Hier käme es sonst bereits zu einer Entzündung. Damit wäre die Wärmeabfuhr durch das schlechtwärmeleitende poröse Material nach außen erschwert. Der Innenraum muß, sollte sich eine Innenkühlung als notwendig erweisen, unter der Ver-

dampfungstemperatur des Kühlmediums gehalten werden. Katalytisch wirkende Materialien sind zu vermeiden. Die in der Reaktionszone erzeugte Wärme wird weitgehend infolge Wärmestrahlung und zu einem geringen Teil infolge Konvektion an ein Kühlmedium übertragen und einem Verbraucher zugeführt. Zur Wärmerückgewinnung ist im Kamin ein Wärmetauscher angeordnet. Das Abgas wird in gleicher Weise analysiert wie bei der Flammenverbrennung.

Als Ziel wird ein alkoholbetriebenes Gesamtsystem angestrebt. Dabei kommt neben gut regelbaren Vorrichtungen für die Verdampfer-, Dosier- und Mischeinheiten besondere Bedeutung dem Katalysatorträger zu. Hier spielen unter anderem Materialien, Porosität, Druckverlust und Temperaturbeständigkeit eine besondere Rolle. Von gleicher Bedeutung wie der Träger ist der Katalysator selbst. Material, Belegungsgrad, Selektivität, Vergiftung, Alterung und Stabilität sind für das System von Wichtigkeit. Alle diese Dinge werden sowohl in Kurz- als auch Langzeitversuchen gemessen. Weitere Arbeiten beziehen sich auf die Optimierung der Wärmeabfuhr. Die Versuche werden zunächst mit reinem Methanol durchgeführt. Bei ausreichender Erfahrung und gutem Verständnis sollen auch Alkoholgemische eingesetzt werden.

### Abgasanalytik

Bei beiden oben beschriebenen Arbeiten gelten die Analysenwerte des Abgases als Kriterium. Abbildung 6 zeigt schematisch den Aufbau der Abgasanalytik. Aus dem Kamin wird ein Teilstrom des Abgases entsprechend der DIN-Norm mittels eines Absaugekreuzes aus Pyrex- oder Quarzglas durch die Analysenschränke gesaugt. Mittels unterschiedlicher Meßverfahren werden bei jedem Brennstoff kontinuierlich die Verbrennungsprodukte  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  und unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC) als Propanäquivalent gemessen. Bei der Verwendung von Heizöl EL kommen noch Ruß und  $\text{SO}_2$  hinzu. Im Anschluß an jede Messung oder Eichung - ein Teil der Eichgasflaschen ist angedeutet - werden die Brennräume, Kamine, Entnahmevorrichtungen und Meßgeräte mit Stickstoff gespült.

Diskontinuierlich gemessen werden, vornehmlich beim Betrieb mit Energiealkohol, Aldehyde, Säuren und unverbrannte Brennstoffanteile. Zu diesem Zwecke wird eine weitere Teilmenge des Abgases durch mehrere hintereinandergeschaltete Absorptionsgefäße, die je nach Bedarf entweder mit destilliertem oder schwerem Wasser gefüllt sind, gefördert. Aus Gründen der

Vereinfachung ist nur ein Strang mit zwei Flaschen dargestellt. Wie auch bei der kontinuierlichen Messung werden die Teilmengen später wieder dem Abgaskamin zugeführt. Nach einer Aufbereitung der Flüssigkeiten aus den Absorptionsgefäßen werden die Proben mittels Hochdruckflüssigkeitschromatographie (HPLC) auf Aldehyde und Säuren untersucht. Der Restbrennstoff kann entweder gaschromatographisch (GC) oder mit Hilfe eines Kernresonanzspektrometers (NMR) bestimmt werden. Da sich ein Großteil der zu bestimmenden Stoffe im Kondensat niederschlägt, muß jeweils auch das Kondenswasser untersucht werden. Aus der Menge des Teilstromes, der Kondensatmenge und der gesamten Abgasmenge lassen sich dann die auf das Abgas bezogenen Komponenten bestimmen.

### Ergebnisse

Das Prüfflammrohr wurde in ersten Versuchen mit Erdgas H betrieben. Dabei wurde ein Gebläsebrenner der Firma Weishaupt eingesetzt. Hauptziel dieser Versuche war die Erprobung der Analysengeräte. Dabei wurden verschiedene Brennerleistungen bei einem Kohlendioxidanteil gefahren, so daß Luftzahlen von etwa 1,1 erreicht wurden. Diese Fahrweise führte zu  $\text{NO}_x$ - und CO-Konzentrationen von etwa 30 ppm bzw. 60 ppm. Die mittels Flammenionisationsdetektor bestimmten Anteile unverbrannter Kohlenwasserstoffe lagen zwischen 2 ppm und 6 ppm. Alle genannten Werte beziehen sich auf unverdünntes Abgas. Formaldehyd konnte nicht nachgewiesen werden.

Nach zahlreichen Versuchen mit verschiedenen Katalysatorträgern haben sich beim Betrieb des Strahlungsbrenners Träger aus Fasern als geeignet herausgestellt. Festkeramikkörper zeigten bereits nach kurzen Versuchszeiten Risse infolge zu hoher Temperaturgradienten. In weiteren Vorversuchen waren Faserkörper mit direkt aufgebrachtem Platin, das als Katalysator diente, eingesetzt worden. Aus bisher noch nicht völlig geklärten Gründen kam es hierbei bei kleinen Luftverhältnissen zu einem Nachinnenwandern der Reaktionszone und damit zu einer Entzündung des Gemisches im Zuströmbereich. Als bisher beste Lösung zeigte sich eine Kombination aus Faserformkörpern mit aufgewickelten Drahtgeweben, auf die Platin aufgebracht worden war. Die Faserkörper aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und  $\text{SiO}_2$  der Firma Gossler weisen eine Länge von 300 mm auf. Außen- und Innendurchmesser betragen 100 mm bzw. 40 mm. Eine möglichst hohe Faserdichte erwies sich als vorteilhaft.

Die in Abbildung 7 dargestellten Versuchsergebnisse gelten für einen Körper mit einer Dichte von  $340 \text{ kg/m}^3$  und einem Drahtgewebe aus dem Material 1.4841. Maschenweite und Drahtdurchmesser betragen 0,2 mm bzw. 0,13 mm. Auf dieses Netz war eine Platinmenge von 1 g aufgebracht. Das Bild zeigt gemessene HC-,  $\text{NO}_x$ - und CO-Werte in Abhängigkeit vom Luftverhältnis. Die dargestellten Ergebnisse sind ebenfalls auf 0 % Sauerstoff im Abgas umgerechnet. Als Parameter ist die auf die Flächeneinheit bezogene freigesetzte Wärmemenge angegeben. Da der Flammenionisationsdetektor erst später geliefert worden war und das Meßgerät zur Bestimmung der NO-Konzentration während der ersten Meßreihe defekt war, können für die HC- und  $\text{NO}_x$ -Werte nur zwei Kurvenverläufe angegeben werden. Die Versuche wurden jeweils, beginnend bei der Luftzahl 2, in Richtung kleinerer Luftverhältnisse gefahren. Wie die Diagramme zeigen, konnte nur bei der geringsten Flächenbelastung von  $50 \text{ kW/m}^2$  - dies entspricht einer Wärmefreisetzung von 4400 W - der stöchiometrische Wert von 1 erreicht werden. In den anderen Fällen führten die Luftzahlreduzierungen von unter 1,3 bzw. 1,5 zu einer Entzündung des Gemisches im Innenraum und damit zu starker Verminderung der Oberflächentemperatur auf der Katalysatorseite.

Die CO-Werte deuten an, daß die günstigste Wärmeleistung etwa  $50 \text{ kW/m}^2$  zu sein scheint. Bei stöchiometrischer Fahrweise lagen die CO-Konzentrationen allerdings außerhalb des Meßbereichs. Aber bereits bei einer Luftzahl von 1,1 wurde ein Wert von nur 50 ppm gemessen. Dann steigen die Konzentrationen wieder schwach an. Dies deckt sich mit amerikanischen Untersuchungen, bei denen ein Strahlungsbrenner mit Erdgas betrieben worden war. Mit zunehmender Wärmebelastung steigen die CO-Konzentrationen ebenfalls. Erwartungsgemäß wurden mit 14 ppm  $\text{NO}_x$  sehr geringe Werte gemessen. Dies gilt auch für die Kohlenwasserstoffe im obersten Teil des Bildes, die zu 18 ppm bei einer Luftzahl von 1,3 und 23 ppm bzw. 33 ppm bei 2,0 bestimmt wurden. Die Meßreihe mit einer Flächenbelastung von  $50 \text{ kW/m}^2$  wird noch nachgefahren. Dafür werden ähnlich niedrige Werte erwartet.

Die Ursache für die Entzündung des Gemisches im Innenraum, die jeweils zum Abbruch der Meßreihe führte, wird in zu hohen lokalen Drahtgewebetemperaturen gesehen. Dies führt zu Dehnungen und damit zu einem Abheben des Netzes vom Faserkörper und somit zu einem Wandern der Reaktionszone. Einer genaueren Messung der Oberflächentemperaturen, die optisch bestimmt werden, und einer strikten Einhaltung gewisser Grenztemperaturen, die aber noch nicht

festliegen, kommt besondere Bedeutung zu. Diese Probleme werden beim Einsatz direkt mit Platin beschichteter Körper nicht erwartet. Hierzu bedarf es aber einer genau eingehaltenen sehr dünnen Schichtdicke. Erste Versuche mit Körpern, die auf eine neue Methode mit Katalysator belegt werden, können erst später durchgeführt werden.

#### Literatur

- /1/ v.d. Decken, C.B.; Dötsch, H.; Höhle, B.; Fedders, H.;  
 Riensche, E.; Bröckerhoff, P.; Pischinger, F.; Hilger, U.; Barnert, H.; Niessen, H.; Walbeck, M.;  
 Energie-Alkohole  
 Herstellung und Nutzung eines synthetischen flüssigen Energieträgers  
 Jül-Spez-392, S. 52-67 (1987)
  
- /2/ Schaedel, S.V.  
 Pyrocore - ein Strahlungsbrenner mit glänzender Zukunft  
 GWF-Gas/Erdgas, 126, Heft 12, S. 697-702 (1985)
  
- /3/ Freitag, A.  
 Verhalten von Katalystrahlern bei Betrieb mit Luftvormischung zum  
 Gas und der Verbrennung von Luft gegen eine Gasatmosphäre  
 Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums  
 Nordrhein-Westfalen, Nr. 472, (1985)

	Methanol	Heizöl (EL)	Gas (CH <sub>4</sub> )
Molekulargewicht M (kg/Kmol)	32,04		16,04
Adiabate Verbrennungs- temperatur t <sub>ad</sub> (K)	2217	2382	2311
Heizwert H <sub>u</sub> (MJ/kg)	19,95	42,70	50,00
Brennwert H <sub>o</sub> (MJ/kg)	22,69	45,50	55,49

Abb. 1: **Vergleich einiger Brennstoffdaten**

Einrichtung	Betreiber	Leistung Q (KW)	Brennstoffe
Raum- heizofen	Ashikawa Technical College, Hokkaido University, Sapporo/Japan	8,6	– Methanol – Methanol + 20 % Wasser – Kerosin – Kerosin + Methanol
Prüfstand	Versuchsanstalt für Brennstoffe/Mailand	115 230	– Methanol – Heizöl (Gasöl)
Prüfstand	Gaswärmeinstitut/ Essen	700	– Methanol
Dampf- kessel	Southern California Edison Company/ USA	45000	– Methanol – Heizöl – Gas
Dampf- kessel	Patterson Station of New Orleans, Public Service Company/USA	50000	– Methanol – Öl (No. 5 u. 6) – Gas
Prüfstand	University Berkeley/ USA	60	– Methanol – Methanol/ Kohle
Konven- tioneller Ölofen	Canadian Combustion Research Laboratory, Ottawa	23000	– Methanol
Prüf- stand; Kessel- simulator	Environmental Protection Agency, North Carolina/USA	90 1000	– Methanol – Methanol + 50 % Isopro- panol – Propan
Dampf- kessel	Piratinga/Brasilien	110000	– Ethanol – Heizöl

Abb. 2: **Brennerversuche**



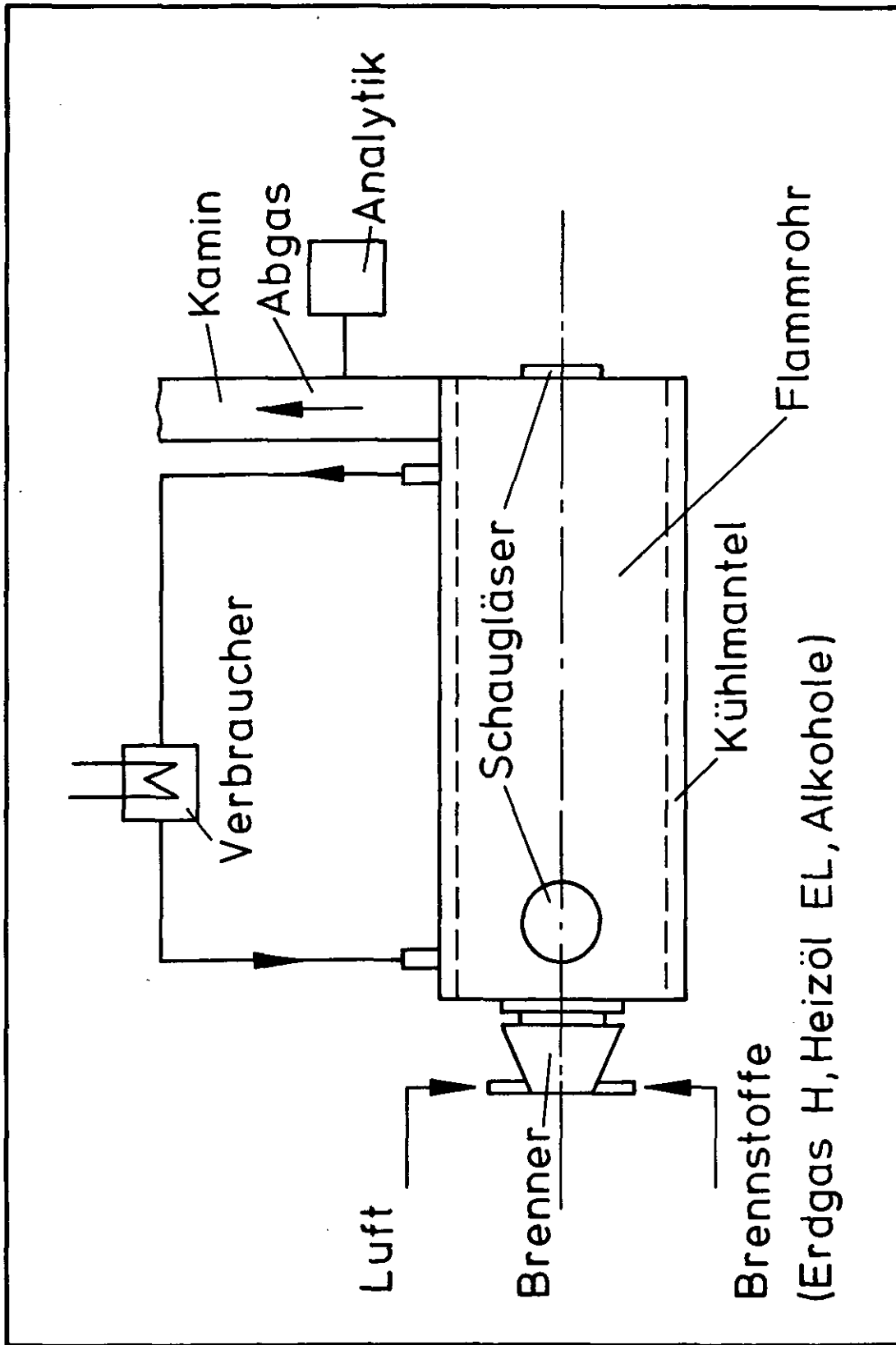


Abb. 3: Brennerprüfstand

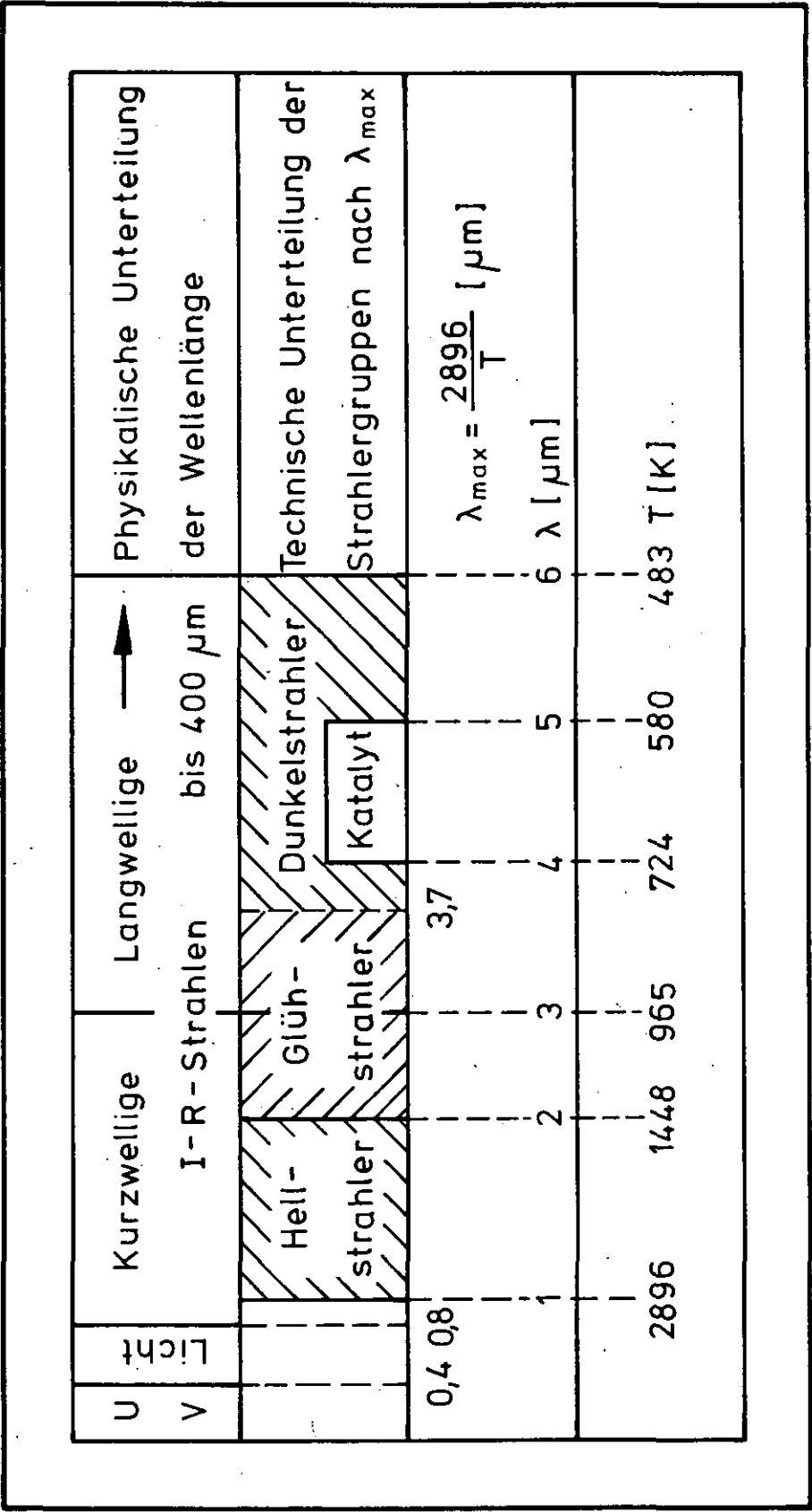


Abb. 4: Strahlertypen

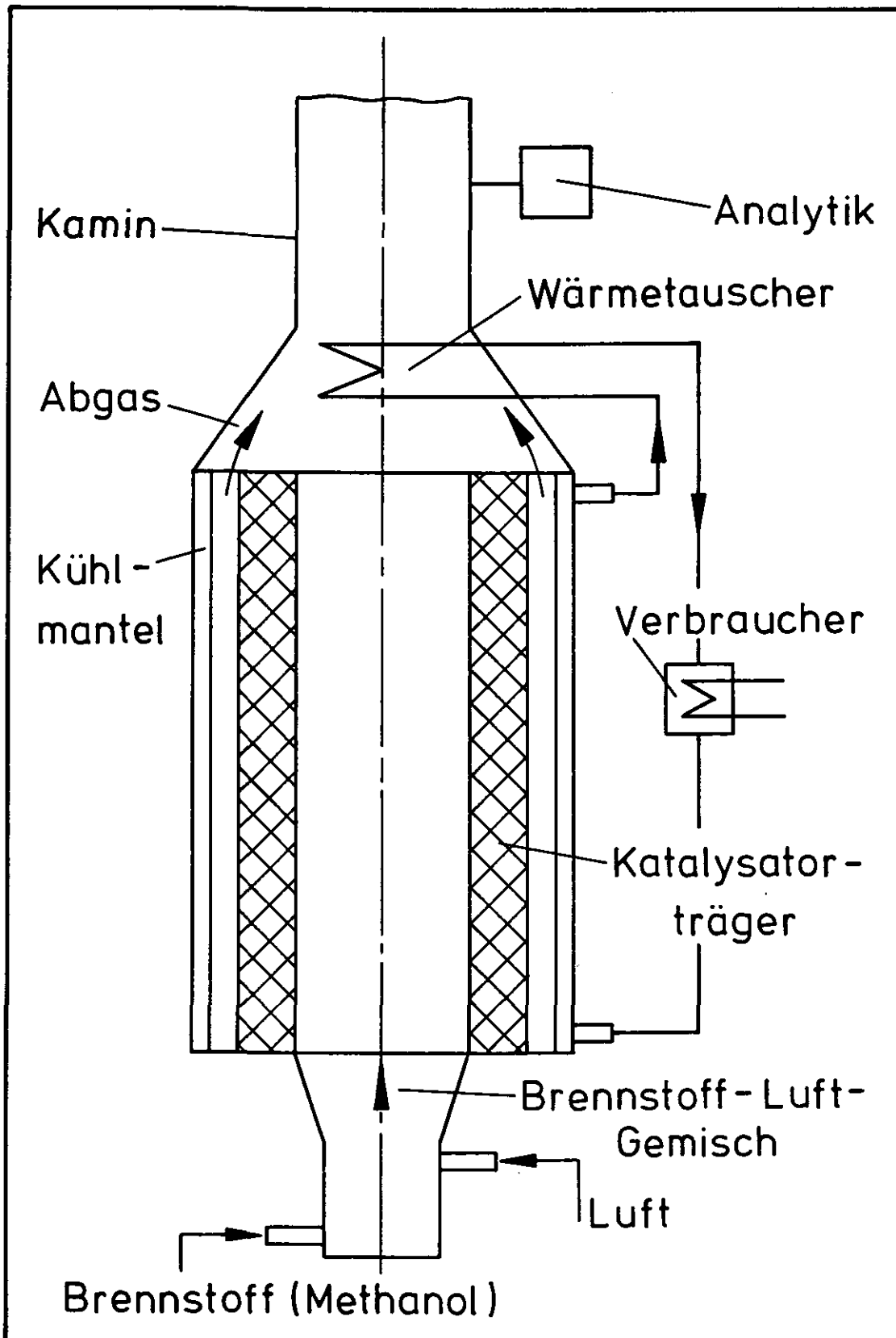


Abb. 5: Strahlungsbrenner

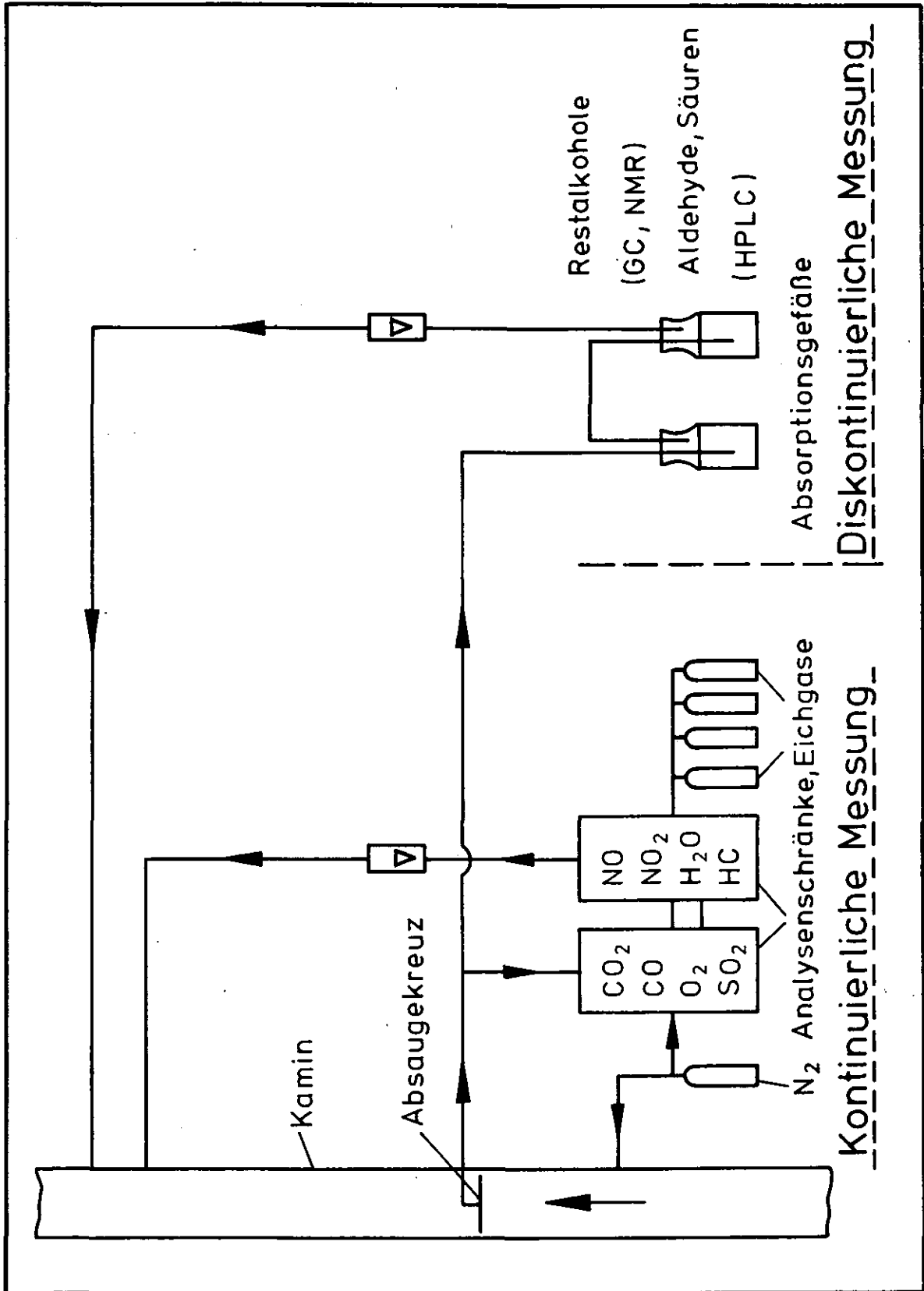


Abb. 6: Analytik

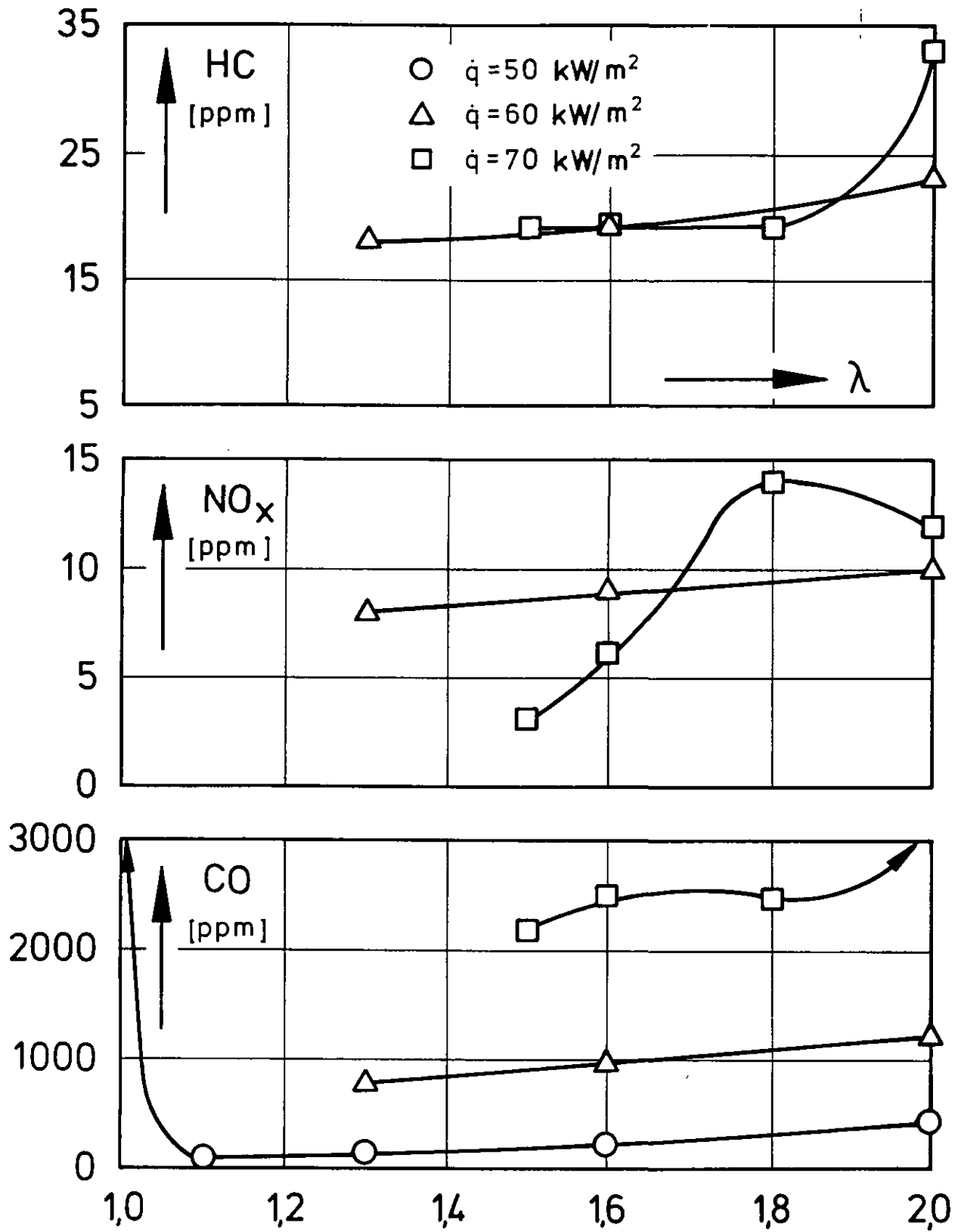


Abb. 7: Abgaswerte

Fließen von Katalysatorpartikeln in einer Rauchgasreinigungsanlage;  
Stoffübergang im Gebiet abgelöster Strömung  
- zwei Beispiele für den  
Einsatz von Großrechnern zur Lösung technischer Probleme.

E. Achenbach

### Einleitung

Der Schwerpunkt der Arbeiten des Instituts für Reaktorbauelemente liegt auf experimentellem Gebiet. Wenn möglich, werden die Versuche von numerischen Berechnungen begleitet. Dies hat den Vorteil, daß Parameterstudien schneller und kostengünstiger, als es im Experiment möglich ist, durchgeführt werden können und somit physikalische Zusammenhänge deutlicher erscheinen. Einen Ersatz für das Experiment stellen diese Rechnungen jedoch nicht dar.

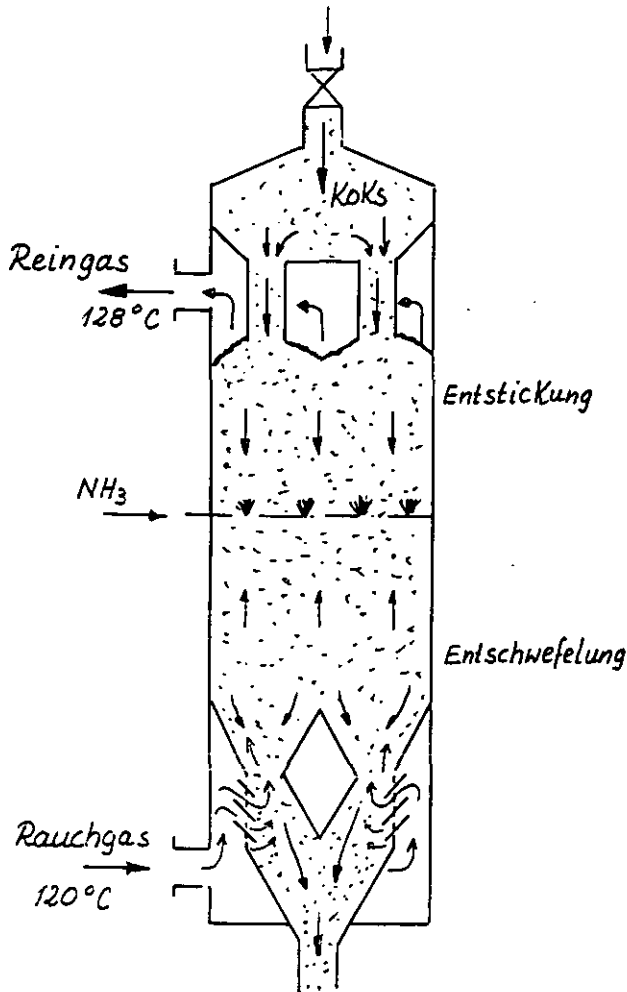
An zwei Beispielen soll der Einsatz numerischer Rechnungen im Zusammenhang mit experimentellen Ergebnissen demonstriert werden. Die Beispiele sind so gewählt, daß die Darstellung der Ergebnisse für alle Hörer dieses Kolloquiums interessant genug ist. Die theoretischen sowie auch die experimentellen Ergebnisse werden in Form von kurzen Filmen dargeboten.

### Beispiel 1:

Das IRB betreibt im Heizwerk der KFA eine Versuchsanlage zur Entschwefelung und Entstickung von Rauchgasen mit Hilfe von Aktivkoks. Es handelt sich um eine Modifikation des Bergbauforschungsverfahrens (BF-Verfahren). Während beim BF-Verfahren Rauchgas und Koks im Querstrom geführt werden, wurde für die eigene Anlage das Gegenstromprinzip gewählt, um eine höhere Beladung des Aktivkokes mit Schwefelsäure zu erzielen.

Abb. 1 zeigt das Schema der Versuchsanlage. Das Rauchgas tritt mit 120 °C in den Reaktionsbehälter ein, durchströmt die Jalousien, sodann das Aktiv-

koksbedt von unten nach oben. Es verläßt als Reingas mit 128 °C die Reinigungsanlage. In der unteren Hälfte findet der Entschwefelungsschritt statt.  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  werden adsorptiv am Koks gebunden. Die Komponenten reagieren unter katalytischer Wirkung des Aktivkokes zu  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , also zu Schwefelsäure. Diese wird im Aktivkoks abgespeichert. Im zweiten Schritt wird  $\text{NH}_3$  (Ammoniak) eingedüst. Hierdurch wird der Entstickungsschritt eingeleitet.  $\text{NO}_x$  wird unter katalytischer Wirkung des Aktivkokes zu  $\text{N}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  reduziert.



Anlage zur Rauchgasreinigung (Schema). Abb. 1

Der Aktivkoks wird von oben in den Reaktionsbehälter eingefüllt und durchläuft ihn von oben nach unten. Während im Entstickungsteil der Aktivkoks nur katalytische Funktion hat, lädt er sich beim Durchwandern des Behälters im Entschwefelungsteil zunehmend mit Schwefelsäure auf und verläßt mit einer Gewichtsbeladung von etwa 30 % den Reaktionsbehälter an seinem unteren Ende.

Ein über den Querschnitt gleichmäßiger Koksabzug ist für die Effektivität des Reinigungsverfahrens von großer Bedeutung. Aus diesem Grunde muß der Fließvorgang der Aktivkokspartikel durch den Behälter bekannt sein. Die Berechnung dieses Vorganges sowie die Darstellung einiger experimenteller Ergebnisse ist Gegenstand meines Vortrages.

Die Bewegungsgleichung für das Fließen der Partikel ergibt sich aus der Spannungs-Dehnungsbeziehung, d. h. die Partikel fließen in Richtung der größten Spannung.

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) \tan(2\theta) = 0 \quad (1)$$

Die Größe  $\theta$  in Gleichung (1) gibt die Richtung der Normalspannung an.

$\psi$  ist die Stromfunktion, deren Ableitung die Geschwindigkeitskomponenten  $u$  und  $v$  ergibt.

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (2)$$

Der Ansatz für die Stromfunktion ist so gewählt, daß die Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

identisch erfüllt ist. Hat man aus Gleichung (1) die Stromfunktion  $\psi$  errechnet, so kann man die Geschwindigkeitskomponenten  $u$  und  $v$  in jedem Punkte des betrachteten Systems bestimmen und somit einzelne Partikel beim Durchlaufen des Reaktionsbehälters verfolgen.

Außer der Stromfunktion  $\psi$  tritt in Gleichung (1) als Unbekannte der Winkel der Hauptspannung  $\theta$  auf. Sie erhält man mit Hilfe des Mohrschen Spannungskreises aus dem Verhältnis der Scherspannung zu der Differenz der Normalspannungen in beiden Richtungen.



$$\tan \Theta = - \frac{2 \tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (4)$$

Die Scher- und Normalspannung wiederum erhält man aus einer Betrachtung des Kräftegleichgewichtes an einem Volumenelement. Dies ergibt:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} [\sigma(1 - \sin \varphi \cos 2\Theta - \sigma_0)] + \frac{\partial}{\partial y} (\sigma \sin \varphi \sin 2\Theta) - \rho g &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial y} [\sigma(1 + \sin \varphi \cos 2\Theta - \sigma_0)] + \frac{\partial}{\partial x} (\sigma \sin \varphi \sin 2\Theta) &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Das gekoppelte Gleichungssystem (5) enthält als Unbekannte nur noch die Hauptspannungen  $\sigma$  sowie den Winkel für die Richtung der Hauptspannungen  $\Theta$ .  $\varphi$  ist der sogenannte Reibungswinkel, der im Schüttgut sowie an den Wänden aus dem Experiment bestimmt werden muß.

Die Lösung des Gleichungssystems (1) und (5) mit den Unbekannten  $\psi$ ,  $\Theta$  und  $\sigma$  geht nun so vor sich, daß zunächst das Gleichungssystem (5), also der Spannungszustand im Reaktionsbehälter berechnet wird. Daraus ergibt sich für jeden Maschenpunkt der Winkel der Hauptspannungen  $\Theta$ . Mit dieser Größe kann dann Gleichung (1) numerisch gelöst werden, so daß mit Hilfe der Gleichung (2) das Geschwindigkeitsfeld vorliegt. Dieses erlaubt einzelne Partikel auf ihrem Weg durch den Reaktor zu verfolgen.

Ein Beispiel für die Spannungsverteilung in dem Reaktionsbehälter zeigt Abb. 2. Hier sind die Normalspannungen in der Symmetrieebene sowie die Scherspannungen am Rande des Behälters aufgezeichnet. Man erkennt deutlich, daß die Zunahme der Normalspannung mit zunehmender Tiefe nicht wie bei einer Flüssigkeit linear ansteigt, sondern niedrigere Spannungen berechnet werden. Der Grund hierfür ist die Tatsache, daß sich die Koks-partikel an den Seitenwänden durch die Wirkung der Reibungskräfte abstützen.

An einem kleinen Versuchsmodell (Abb. 3) wurde das Fließverhalten experimentell untersucht. Hierbei wurden Tests einmal ohne Verdrängerkörper (Abb. 3a) und einmal mit Verdrängerkörper (Abb. 3b) durchgeführt. Die in Abb. 3a

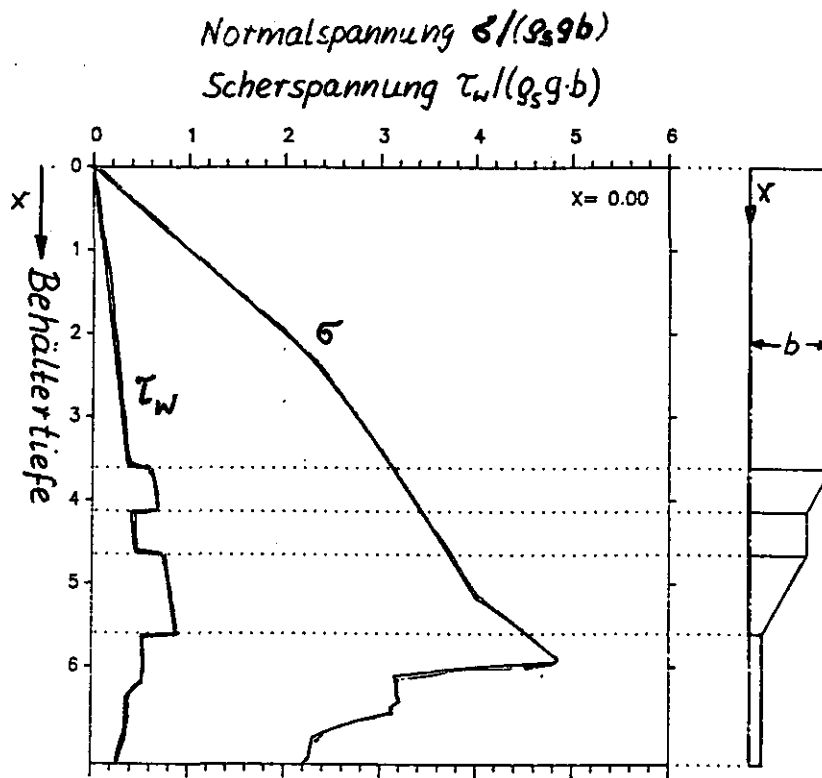
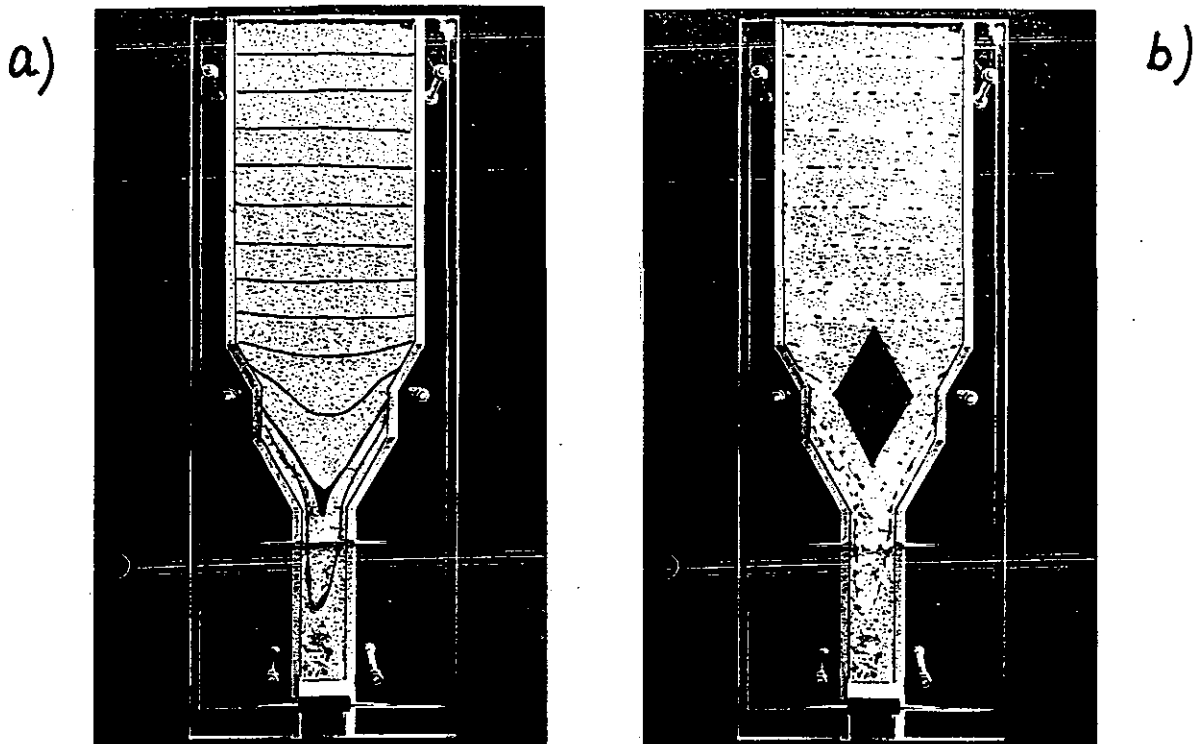


Abb. 2 Spannungsverteilung in der Schüttung

Abb. 3 Versuchsmodell zum Fließen von Katalysatorpartikeln  
 a) ohne                      b) mit Verdrängerkörper

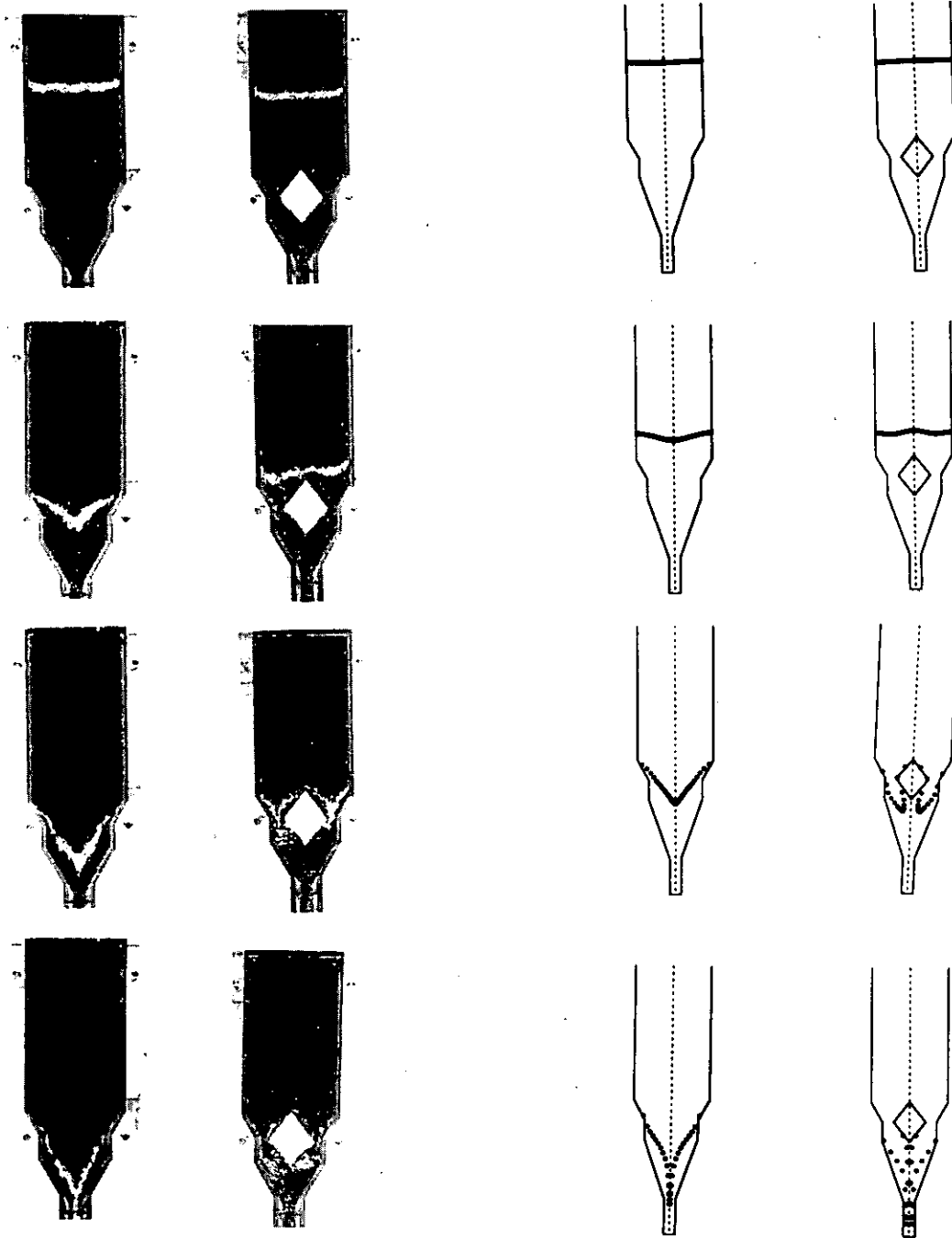


Abb. 4 Filmausschnitt zum Fließen von Katalysatorpartikeln.  
Links: experimentell: rechts: theoretisch.

eingezeichneten Linien sind Isochronen. Sie geben für konstante Zeitschritte während des Durchströmvorganges die Lage einer angefärbten Partikelschicht wieder.

Im folgenden Film wird der Fließvorgang durch Anfärben einer Partikelschicht sichtbar gemacht. Im Anschluß an das Experiment wird die entsprechende numerische Lösung dargestellt. Sowohl im Experiment als auch in der Theorie werden jeweils die Fälle ohne und mit Verdrängerkörper betrachtet. Der kurze Film endet mit einem Vergleich der berechneten Ergebnisse für den Behälter mit oder ohne Verdrängerkörper. Es zeigt sich, daß durch den Verdrängerkörper eine Vergleichmäßigung des Koksabzuges erreicht wird. In Abb. 4 sind Reproduktionen, die dem Film entnommen sind, wiedergegeben. Sie zeigen die Isochronen zu ausgewählten Zeitpunkten.

### Beispiel 2:

Das zweite Beispiel ist dem Bereich der Sicherheitstechnik für Hochtemperaturreaktoren entnommen. Bekanntlich ist der Hochtemperaturreaktor im Core-Bereich graphitisch aufgebaut. Durch Abrieb entsteht Staub, der mit radioaktiven Spaltprodukten beladen ist. Hieraus ergeben sich zwei sicherheitstechnische Fragestellungen.

- Kommt es in Gebieten abgelöster Strömung zur vermehrten Ablagerung von Staub?
- Findet bei einem Störfall durch Änderung der Strömungsverhältnisse ein erhöhter Staubaustrag aus solchen Gebieten statt, so daß mit einer Kontamination außerhalb des Primärkreises gerechnet werden muß?

Von diesen beiden Fragen möchte ich in meinem Vortrag nur den ersten Punkt behandeln. Dieses Problem läuft auf ein Stofftransportproblem hinaus. Die entsprechende Transportgröße ist die Konzentration. Bei Gültigkeit der Analogie zwischen Stoff- und Wärmeaustausch kann das Problem auch als ein Wärmetransportproblem dargestellt werden. Hier tritt die Temperatur  $\Theta$  als

Transportgröße auf. Im weiteren Verlauf wird das Stofftransportproblem als Wärmetransportproblem behandelt.

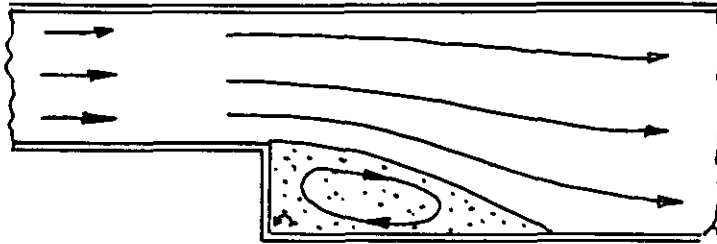


Abb. 5 Einseitige Kanalerweiterung

Der gewählte Typ für das Rückströmgebiet ist die einseitige Kanalerweiterung (Abb. 5). Bei der Überströmung der Stufenkante entsteht ein Rückströmgebiet, in dem sich ein Wirbel im Uhrzeigersinne sowie ein kleinerer im Gegenuhrzeigersinne dreht. Das Rückströmgebiet ist durch geringe Wandschubspannungen gekennzeichnet, so daß sich hier der Staub vorzugsweise ablagern kann.

Zur Berechnung dieses Vorganges müssen das Geschwindigkeitsfeld sowie das Temperaturfeld berechnet werden. In einem ersten Schritt soll dies für die laminare Strömung durchgeführt werden. Das Strömungsfeld wird durch die Navier-Stokesschen Differentialgleichungen beschrieben. Für unseren Fall wurde die Formulierung als Wirbeltransportgleichung gewählt.

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \tau} = \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \Omega}{\partial y} - \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial \Omega}{\partial x} + \frac{2}{Re} \left[ \frac{\partial^2 \Omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial y^2} \right] \quad (6)$$

Durch Einführung des Wirbelvektors

$$\Omega = -\frac{1}{2} \left[ \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right] \quad (7)$$

gelingt es, in den Bewegungsgleichungen den Druckgradienten zu eliminieren. Dies hat den Vorteil, daß man die Schwierigkeit bei der Formulierung der Randbedingungen für den Druck umgehen kann.  $\psi$  ist wiederum die Stromfunktion, für die der Ansatz

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad v = - \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (8)$$

gemacht wird, der die Kontinuitätsgleichung identisch erfüllt. Zur Lösung des Geschwindigkeitsfeldes sind die Gleichungen (6) und (7) simultan zu lösen. Man erhält als Ergebnis die Stromfunktion, aus der sich die Geschwindigkeitskomponenten nach Gleichung (8) berechnen lassen. Diese werden in die Energiegleichung

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = - \left[ u \frac{\partial \Theta}{\partial x} - v \frac{\partial \Theta}{\partial y} \right] + \frac{2}{Pe} \left[ \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} \right] \quad (9)$$

eingesetzt, so daß aus Gleichung (9) die Temperaturverteilung numerisch berechnet werden kann.

Die Gleichungen (6) und (9) enthalten für den Wirbelvektor bzw. für die Temperatur den instationären Term. Grund hierfür ist die Tatsache, daß für stationäre Verhältnisse die Randbedingungen für die genannten Feldgrößen nicht formuliert werden können. Durch die instationäre Betrachtung wird das Problem zeitlich gesehen zu einem Anfangswertproblem gemacht, wobei man das Anfahren der Strömung aus der Ruhelage betrachtet. Zur Zeit  $\tau = 0$  herrscht Potentialströmung, also ein bekanntes Strömungsfeld. Entsprechend verfährt man bei der Lösung der Energiegleichung und setzt zur Zeit  $\tau = 0$  die wärmeübertragende Wand auf den Wert  $\Theta = 1$ , während im übrigen Feld die Temperaturen  $\Theta = 0$  herrschen.

Die numerische Berechnung wurde mit Hilfe der Crank-Nicolson-Methode sowie eines impliziten Verfahrens für den Wirbelvektor  $\Omega$  und eines Relaxationsverfahrens für die Stromfunktion  $\psi$  durchgeführt. Die Energiegleichung wurde ebenfalls nach der impliziten Methode integriert. Die Gleichungen (6), (7) und (9) liefern als Lösung das Feld der Stromfunktion, des Wirbelvektors und der Temperaturen. Aus diesen Größen können alle Strömungsgrößen wie Geschwindigkeitsverteilung, Druckverteilung, Wandschubspannungsverteilung sowie bei der Energiegleichung die Wärmestromdichten errechnet werden. Abb. 6 zeigt die Rechenergebnisse für die Stromfunktion  $\psi$  und das Temperaturfeld  $\Theta$  für eine Reynolds-Zahl  $Re = 359$ . Die geschlossenen Linien im

Bild der Stromfunktion zeigen den Wirbel im Rückströmgebiet hinter der Stufe an. Das untere Bild gibt das Isothermenfeld wieder. Dort, wo die Liniendichte am größten ist, sind auch die Wärmestromdichten am größten. Dies ist beispielsweise am Auftreffpunkt der Strömung etwa fünf Stufenhöhen stromab der Kante der Fall.

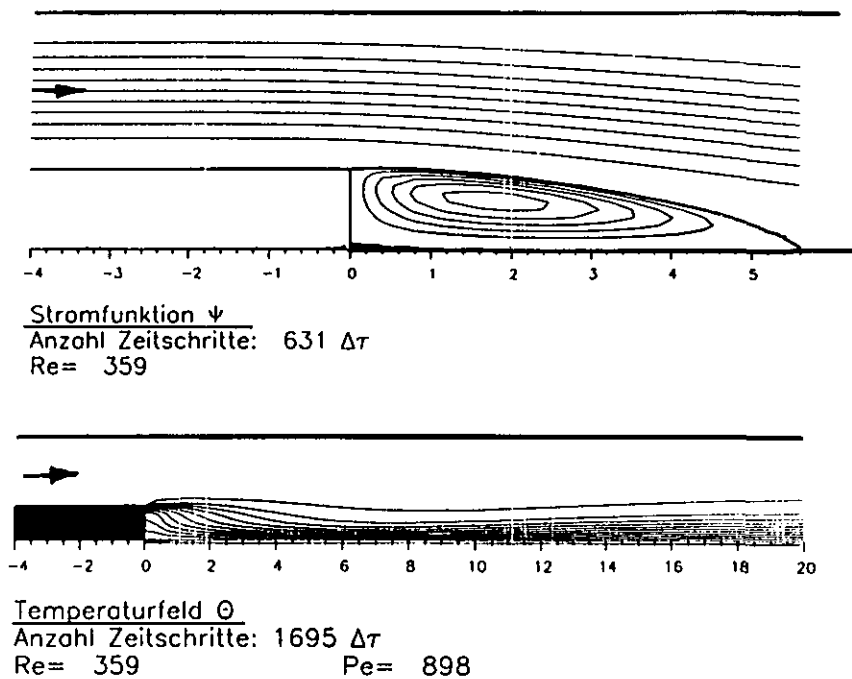


Abb. 6

Die folgenden zwei Bilder zeigen den Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Ergebnissen. Abb. 7 zeigt die Länge des Totwassergebietes als Funktion der Reynolds-Zahl. Die Dreiecksymbole sind experimentelle Ergebnisse von Denham and Patrick /1/. Die gestrichelte Linie stellt die berechneten Ergebnisse dar. Man erkennt, daß mit zunehmender Reynolds-Zahl das Totwassergebiet in seiner Erstreckung zunimmt, aber für Reynolds-Zahlen  $Re > 300$  auf einen konstanten Wert von etwa 12 Stufenlängen asymptotisch ausläuft.

Die genannten Autoren haben auch Geschwindigkeitsprofile mit dem Laserdopplernemometer durchgeführt. Der Vergleich ihrer Messungen mit den eigenen Rechnungen zeigt Abb. 8. Hier sind die Ergebnisse für Reynolds-Zahlen von  $Re = 292$  und von  $Re = 916$  dargestellt. Wie auch im vorangehenden Bild erkennt man zwischen Experiment und Theorie eine sehr gute Übereinstimmung.

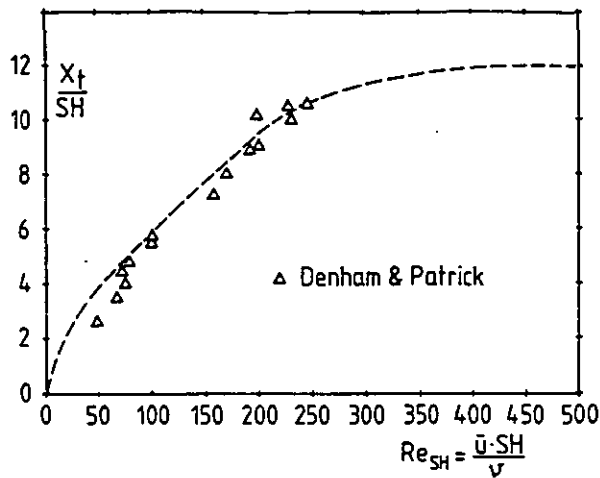


Abb. 7 Länge des Totwassergebietes  
als Funktion der Reynolds-Zahl

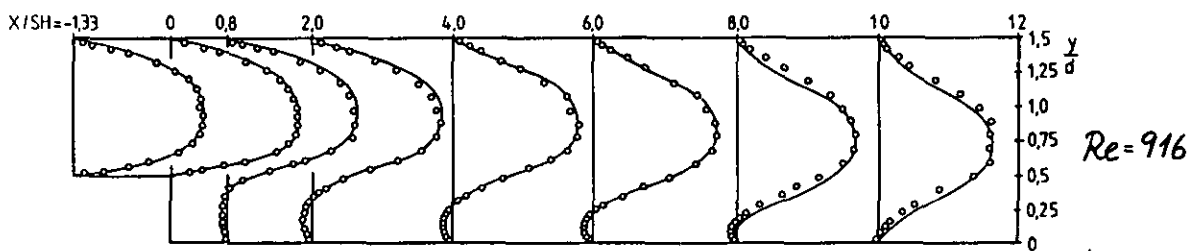
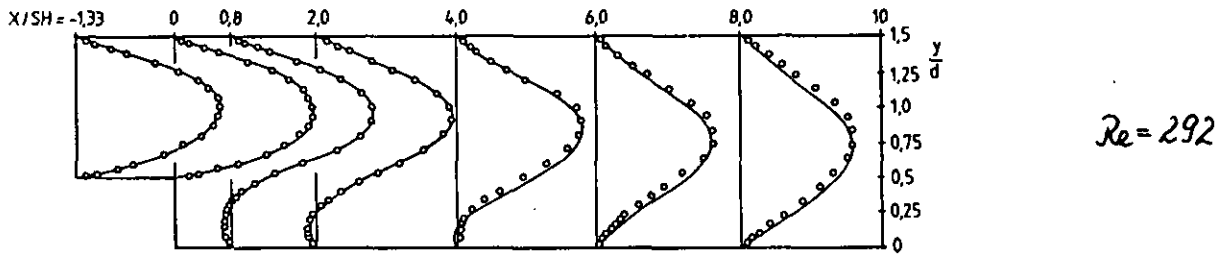
Als Beispiel für die Wärmeübergangsrechnungen sei hier der lokale Wärmeübergang im Nachlauf hinter der Stufenkante bei einer Reynolds-Zahl von  $Re = 359$  und einer Peclet-Zahl von  $Pe = 898$  dargestellt (Abb. 9). Die eingezeichneten Kreissymbole ergeben sich aus einer Stoffübergangsmessung nach dem Verfahren der Naphthalinsublimation in Luft. Aufgetragen ist die örtliche Nusselt-Zahl als Funktion der Lauflänge. Die Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung kann als befriedigend bezeichnet werden. Die Tatsache, daß im größeren Abstand hinter dem Auftreffpunkt der Strömung die experimentellen Ergebnisse systematisch über den berechneten liegen, deutet darauf hin, daß hier instationäre Strömungszustände auftreten, die eine Verbesserung des Wärme- bzw. Stoffüberganges zur Folge haben.

Wie oben erwähnt, beruht das Berechnungsverfahren auf der Beschreibung der zeitlichen Entwicklung der Strömung und des Temperaturfeldes. Erst wenn sich zeitlich die Strömung nicht mehr ändert, gilt die Berechnung als abgeschlossen. Die gesamte Berechnung liefert also die zeitliche Entwicklung des Totwassergebietes hinter der Stufe. Dieser Vorgang wurde für Reynolds-Zahlen von 10, 100, 1000 und 2 000 im Film festgehalten.

Abb. 10 verdeutlicht, daß das Totwassergebiet bei höheren Reynolds-Zahlen instationär wird. Wie das Foto der Strömungssichtbarmachung (Abb. 10a) zeigt, besteht es aus mehreren Wirbeln, die mit der Strömung stromab ge-



tragen werden.



Geschwindigkeitsprofile: — gerechnet; ○ gemessen

Abb. 8

Ähnliche instationäre Vorgänge, wie sie in dieser Momentaufnahme zu erkennen sind, findet man in der gerechneten Sequenz bei  $Re = 2\,000$ , wo der Nachlauf hinter der Stufe instationär wird (Abb. 10b). Auch hier beobachtet man die Aufteilung des Totwassers in zwei große Wirbel und den Transport der Wirbel stromab mit der Strömung.

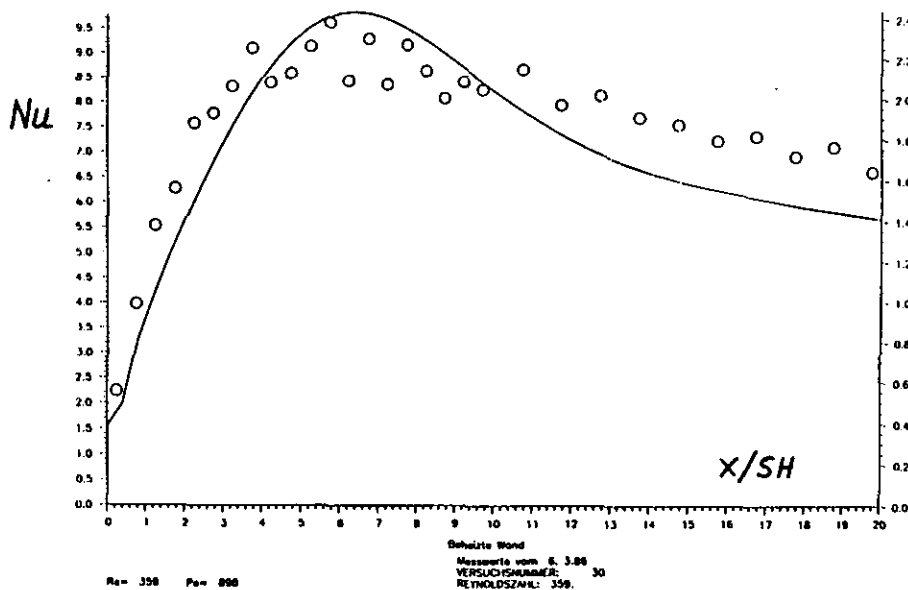


Abb. 9 Lokaler Wärmeübergang hinter der Stufe

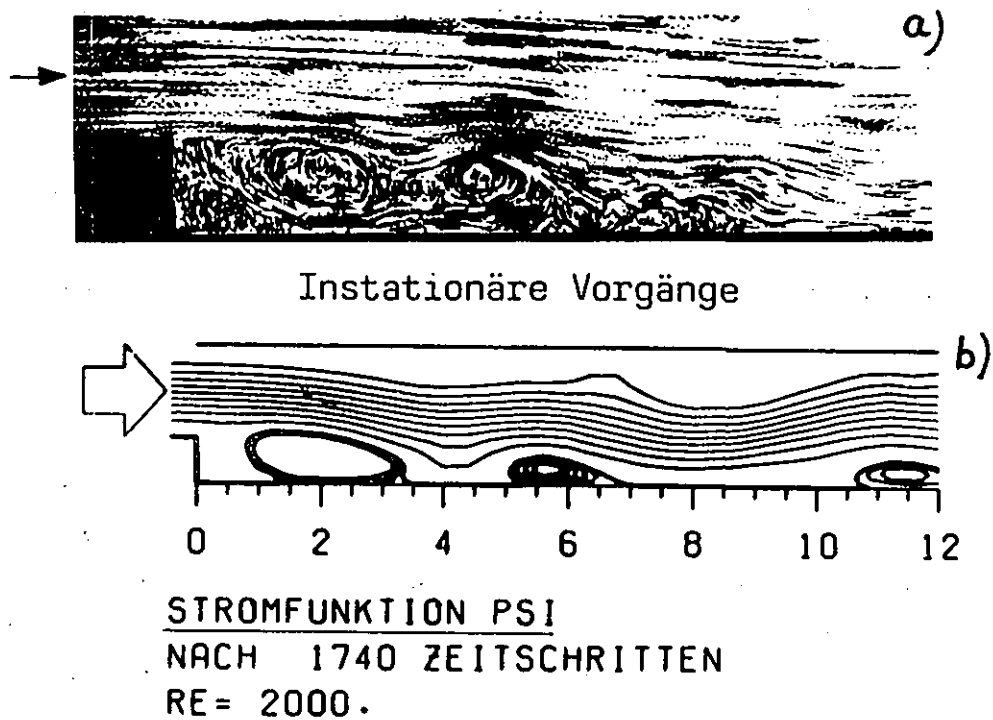


Abb. 10 a) experimentelles b) gerechnetes Ergebnis

#### Literatur

- /1/ Denham, M. K.; Patrick, M. A. Laminar flow over a downstream-facing step in a two-dimensional flow channel.  
Trans. Inst. Chem Engrs. 52 (1974) 361 - 167.

#### Anerkennung

Ich möchte meinen Mitarbeitern für die ausgezeichnete Durchführung der Experimente und Herrn D. Froning dafür danken, daß er durch seine Programmierarbeit wesentlich zum Gelingen der filmischen Darstellung der theoretischen Ergebnisse beigetragen hat.

## Wärme- und strömungstechnische Sonderfragen bei Wärmeübertragern

H.G. Groehn

Einleitung

Hohe Temperatur, hoher Druck und der daran gekoppelte Zwang zu einer kompakten Bauweise sind die wichtigsten Einflußgrößen, die die Entwicklungsarbeit an Wärmeübertragern im IRB bestimmen. In der Vergangenheit erhielten diese Arbeiten ihren wesentlichen Impuls durch die Belange der gasgekühlten Kernreaktoren. In Zukunft wird die Umweltverträglichkeit verfahrens- und kraftwerkstechnischer Anlagen im Vordergrund stehen. Die Steigerung von Druck und Temperatur sind auch hierbei vielfach die geeignete Möglichkeit, um über eine Wirkungsgradverbesserung der wärmeübertragenden Apparate eine Verminderung der Umweltbelastung zu erzielen. Neben Beiträgen zu thermohydraulischen Besonderheiten, die streng an die eingangs genannten Einflußgrößen gekoppelt sind, sind immer wieder auch Fragestellungen allgemeiner Art zu bearbeiten, die entweder erst im Zuge einer Optimierung der Wärmeübertrager wichtig werden oder beim Übergang zu größeren Baueinheiten und bei extremen Betriebsbedingungen zu einem wesentlichen Kostenfaktor werden. Zu diesem Aufgabenbereich zählen die in den letzten Jahren verfolgten Untersuchungen zur Schräganströmung von Wärmeübertragern. Einige spezielle Ergebnisse dieser Grundlagenuntersuchung sollen im folgenden dargestellt und ihre Übertragbarkeit auf einen Wärmeübertrager in großtechnischem Maßstab gezeigt werden.

Als schräg angeströmt wird ein Wärmeübertragerrohr bezeichnet, bei dem der Winkel zwischen Anströmrichtung und Rohrachse größer als  $0^\circ$  und kleiner als  $90^\circ$  ist. In Abb. 1 sind zwei Beispiele für eine Schräganströmung von Wärmeübertragern skizziert. Bei dem rechts in Abb. 1 gezeigten Apparat ist die Hauptströmungsrichtung des die Rohre umströmenden Fluids parallel zur Rohrachse gerichtet, der Anströmwinkel der Rohre mithin  $0^\circ$ . Im An- und Abströmbereich des Wärmeübertragers werden die Rohre quer- bzw. schräg angeströmt. Dieser im Vergleich zur Gesamtlänge des Apparates geometrisch kleine Bereich ist bei konventionellen Betriebsbedingungen von untergeordneter Bedeutung, bei thermisch hoch belasteten Wärmeübertragern kann die genaue Kenntnis der Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilung im An- und Abströmbereich jedoch ausschlaggebend für die Lebensdauer der Komponente sein. Bei dem links in Abb. 1 dargestellten Wärmeübertrager werden die

Rohre über ihre gesamte Länge schräg angeströmt. Die strich-punktierten Linien bezeichnen Rohrzylinder, auf denen die Rohre schraubenförmig um ein Zentralrohr gewandelt sind. Als Besonderheit bei der gezeigten Rohranordnung ist zu beachten, daß die Rohre auf benachbarten Rohrzylindern gegen-sinnig gewandelt sind. Dadurch entstehen sich kreuzende Rohrlagen mit spe-ziellen strömungstechnischen Eigenschaften. Die Darstellung dieser Beson-derheiten, die sich beim Übergang von einer gleichsinnigen Schrägstellung aller Rohre zu einer gekreuzten Schrägrohranordnung ergeben, soll hier ver-tieft werden.

### Thermohydraulik parallel und gekreuzt schräggestellter Rohranordnungen

Phänomenologisch lassen sich die Unterschiede aus Abb. 2 ableiten. Bei pa-ralleler Rohranordnung hat man sich zur gezeigten Rohrebene benachbarte Rohrlagen deckungsgleich vor und hinter der Zeichenebene vorzustellen. Der engste freie Strömungsquerschnitt, den das Fluid auf seinem Weg durch die Rohranordnung passieren muß, liegt mithin jeweils in Höhe der Rohrachse in einer Ebene senkrecht zur Zeichenebene. Der engste freie Strömungsquer-schnitt ist konstant über die gesamte Rohrlänge. Bei der rechts in Abb. 2 gezeigten Rohranordnung existiert der engste freie Strömungsquerschnitt der Rohranordnung mit parallel schräg gestellten Rohren nur noch im Kreuzungspunkt der Rohre, dazwischen ist der Strömungsquerschnitt größer. Das Fluid, auf der Suche nach dem Weg des geringsten Widerstandes, wird den Kreuzungspunkten der Rohre ausweichen und den angedeuteten Zick-Zack-Weg durch das Rohrbündel wählen. Die Ausweichbewegung wird umso ausgeprägter sein, je enger die Querteilung der Rohre ist. Die thermohydraulischen Aus-wirkungen des Überganges von einer parallelen zu einer kreuzweisen Rohran-ordnung lassen sich abschätzen. Aufgrund des verringerten Anteils des engsten freien Querschnitts bei der gekreuzten Schrägrohranordnung müssen sowohl Wärmeübergang als auch Strömungswiderstand abnehmen. In welchem Maße dies geschieht, war nur experimentell zu ermitteln. In Grundlagenunter-suchungen an Geradrohrbündeln wurden Wärmeübergang und Strömungswiderstand bei einem Anströmwinkel von  $\varphi = 60^\circ$  für verschiedene Rohrteilungen er-mittelt. Abb. 3 zeigt die Ergebnisse in dimensionsloser Darstellung als Funktion der Reynolds-Zahl für eine Quer- und Längsteilung der Rohre von  $S_q \times S_l = 1,5 \times 1,5$ . Als Bezugsgeschwindigkeit in den dimensionslosen Kenn-zahlen wurde die Geschwindigkeit im engsten Querschnitt  $u_{eng}$  der parallelen Schrägrohranordnung gewählt,  $u_{eng} = S_q / (S_q - 1) \cdot u_0$ .  $u_0$  bezeichnet die Geschwin-

digkeitskomponente normal zur Rohrachse im Leerkanal. Bezugslänge in den Kennzahlen ist der Rohrdurchmesser. Wie zu erwarten, gruppieren sich die Meßwerte für den Strömungswiderstand und den Wärmeübergang der gekreuzten Rohranordnung in Abb. 3 unterhalb der Werte für die Schrägrohnanordnung mit parallelen Rohren. Einer Verminderung von ca. 14 % beim Wärmeübergang steht jedoch eine Abnahme des Strömungswiderstandes um ca. 42 % gegenüber. Eine Leistungsziffer als Quotient aus übertragener Wärmeleistung zu aufgewandter Pumpleistung ist deshalb bei der gekreuzten Rohranordnung um den Faktor 1,5 günstiger als bei der parallelen Schrägrohnanordnung. Die Nutzen/Aufwand-Relation verbessert sich weiter, wenn die Rohrteilungen verringert werden, Abb. 4. Durch den Übergang von der gleichsinnigen zu einer gegensinnigen Schrägstellung der Rohre bei den Rohrteilungsverhältnissen  $S_q \times S_1 = 1,25 \times 1,25$  kann die oben definierte Leistungsziffer um den Faktor 2,5 verbessert werden.

#### Thermohydraulik Helium/Helium Wärmeübertrager in Wendelbauweise

Die Übertragbarkeit der Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen auf einen Wärmeübertrager größeren Maßstabes wurde am Modell des Helium/Helium-Wärmeübertragers einer nuklearen Prozeßwärmanlage überprüft. Im Hochdruck-Gaskanal des IRB wurde in Zusammenarbeit mit den Firmen Interatom, L & C Steinmüller und Gebr. Sulzer AG der in Abb. 5 gezeigte Apparat bei Drücken bis 40 bar und einer Gastemperatur von ca. 200 °C vermessen. Er war aus 252 Rohren auf sieben Rohrzyklindern mit 45 in Strömungsrichtung hintereinanderliegenden Rohrreihen aufgebaut. Der Rohrdurchmesser betrug 22 mm<sup>Ø</sup>, die Rohrteilungen  $S_q \times S_1 = 1,64 \times 1,48$  (normal zur Rohrachse), der Anströmwinkel  $\varphi = 65^\circ$ . Die Meßergebnisse sind in Abb. 6 dargestellt. Miteingezeichnet sind Linienzüge, die sich aus den Grundlagenuntersuchungen für den Helium/Helium-Wärmeübertrager ableiten lassen. Die gestrichelten Linien würden bei paralleler Wendelung aller Rohre gelten, die ausgezogene Linie gilt für die ausgeführte gegensinnige Wendelung der Rohre. Da die Rohrteilungen des Helium/Helium-Wärmeübertragers in den Grundlagenuntersuchungen nicht vermessen wurden, wurden Literaturangaben nach Grimison herangezogen. Für den Wärmeübergang war in vorausgegangenen Untersuchungen /1/ festgestellt worden, daß bei paralleler Schrägstellung aller Rohre die Gesetzmäßigkeiten der querangeströmten Rohre auch für kleinere Anströmwinkel Gültigkeit haben, wenn in der Reynolds-Zahl, wie hier geschehen, die Geschwindigkeitskomponente normal zur Rohrachse als Bezugsgröße verwendet wird.

Durch die gegenseitige Schrägstellung benachbarter Rohre war für den Helium/Helium-Wärmeübertrager eine Verringerung der Wärmeübergangszahl um 10 % zu erwarten. Gemessen wurde eine Verringerung um ca. 6 %. Unter Berücksichtigung der sowohl den Literaturangaben als auch den Messungen zugrunde liegenden Fehlergrenzen bedeutet dies eine gute Bestätigung der Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen.

Der Strömungswiderstand schräg angeströmter Rohre läßt sich nicht gleichermaßen einfach wie der Wärmeübergang aus den für Querumströmung gültigen Gesetzmäßigkeiten ableiten. Für die Vorausberechnung des Strömungswiderstandes wurde das Geradrohrbündel mit den Rohrteilungen  $S_q \times S_l = 1,71 \times 1,71$  herangezogen, das nach Grimison annähernd denselben Strömungswiderstand wie ein Geradrohrbündel mit der Rohrteilung des Helium/Helium-Wärmeübertragers aufweist und das von uns bei einem Anströmwinkel von  $\varphi = 60^\circ$  sowohl mit parallel als auch mit gegenseitig schräg gestellten Rohren untersucht wurde.

Der Strömungswiderstand der gegenseitig schräg gestellten Rohre ist um 20 - 28 % kleiner als für das Rohrbündel mit parallel gestellten Rohren und stimmt sehr genau mit den Meßwerten für den Helium/Helium-Wärmeübertrager überein.

Am Beispiel der Anlagenplanung für den Helium/Helium-Wärmeübertrager läßt sich anschaulich machen, welcher praktische Gewinn aus der Verbesserung der Nutzen/Aufwand-Relation als Folge einer Verringerung der Rohrteilung zu ziehen ist. Die Großausführung des getesteten Apparates hat eine Leistung von 125 MW und eine aktive Bündellänge von ca. 16 m. Verringert man die Querteilung der Rohre von gegenwärtig 36 mm auf 33 mm und die Längsteilung von 36 mm auf 34 mm, so läßt sich unter sinnvoller Konstanthaltung aller übrigen Konstruktionsparameter die mit der Verringerung der Rohrteilungen einhergehende Abnahme des Strömungswiderstandes in eine Verkürzung des Wärmeübertragers um 25 % oder 4 m umsetzen /3/.

#### Ausblick auf zukünftige Arbeiten

Bei thermisch hoch belasteten Wärmeübertragern ist eine gleichförmige Anströmung der Komponente sehr wichtig. Je geringer der Unterschied zwischen mittlerer und maximaler Geschwindigkeit ist, desto näher darf die Auslegungstemperatur des Wärmeübertragers bei der durch das Rohrmaterial vorgegebenen Grenztemperatur liegen. Aufgabe ist es deshalb, in engem Kontakt zu

Industriefirmen möglichst allgemeingültige konstruktive Gestaltungsmöglichkeiten der Zuströmgeometrie zu erarbeiten.

Der Wärmeübergang querangeströmter Wärmeübertrager läßt sich durch einfache Turbulenzpromotoren um bis zu 50 % steigern. Hierzu wurden im IRB in früheren Jahren bereits einschlägige Vorarbeiten geleistet /2/. Inhalt zukünftiger Arbeiten wird es sein, Turbulenzpromotoren zu erproben, die den speziellen Randbedingungen des Einsatzes bei hohen Temperaturen genügen.

Eine weitere Aufgabe wird in der Ertüchtigung von Wärmeübertragern mit Umlenkblechen für anspruchsvolle Betriebsbedingungen gesehen. Diese einfach aufgebauten und in der Verfahrenstechnik weit verbreiteten Apparate besitzen aus thermohydraulischer Sicht einige bestechende Eigenschaften, so daß sie auch für den Einsatz im Hochtemperaturbereich nutzbar gemacht werden sollten.

#### Literatur

/1/ H.G. Groehn

Influence of the Yaw Angle on Heat Transfer and Pressure Drop of Tube Bundle Heat Exchangers, Heat Transfer 1982, vol. 6, pp. 203-209

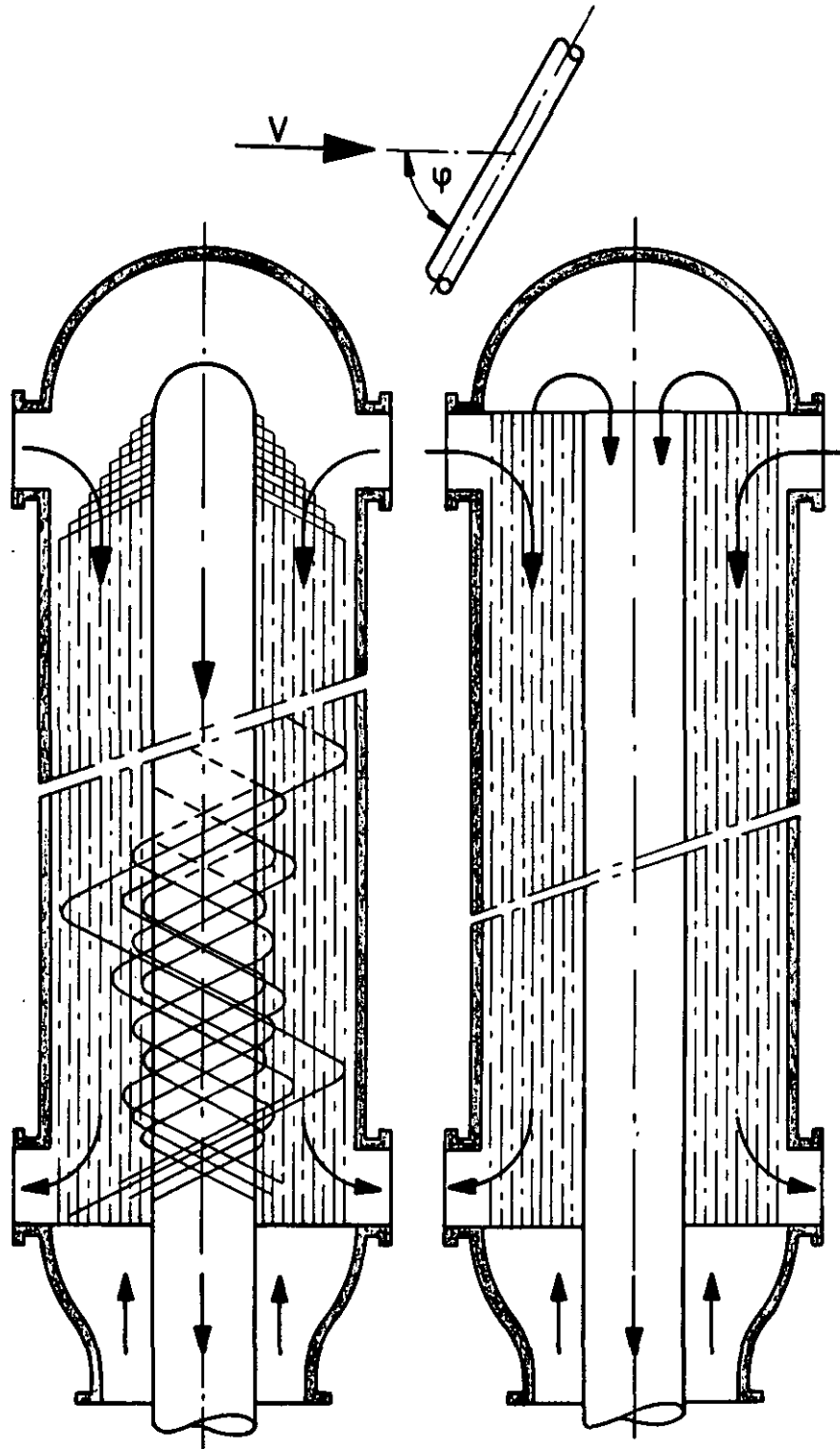
/2/ H.G. Groehn, F. Scholz

Heat Transfer and Pressure Drop of In-Line Tube Banks with Artificial Roughnesses  
Heat Transfer - Soviet Research 1976

/3/ H. Neis, H.G. Groehn

He-He-Wärmeübertrager - Anpassung eines Konstruktionsprinzips an geänderte Betriebsbedingungen und Möglichkeiten zur Beeinflussung der Abmessungen

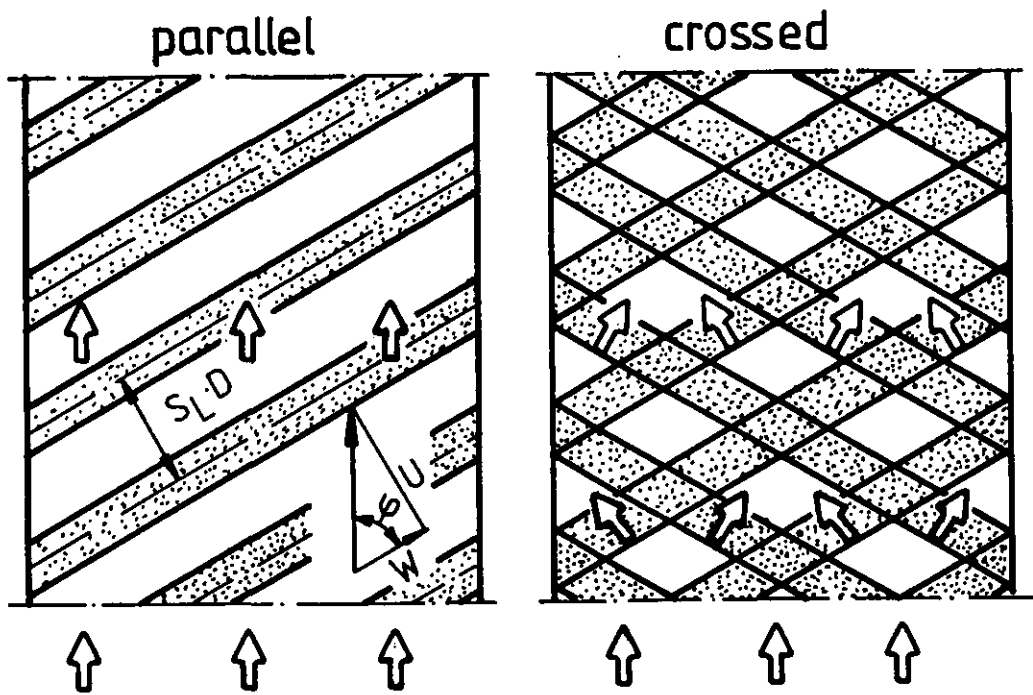
Jahrestagung Kerntechnik 1983, Compact S. 655-658



Schräganströmung von Wärmeübertragern

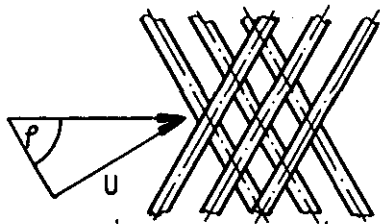
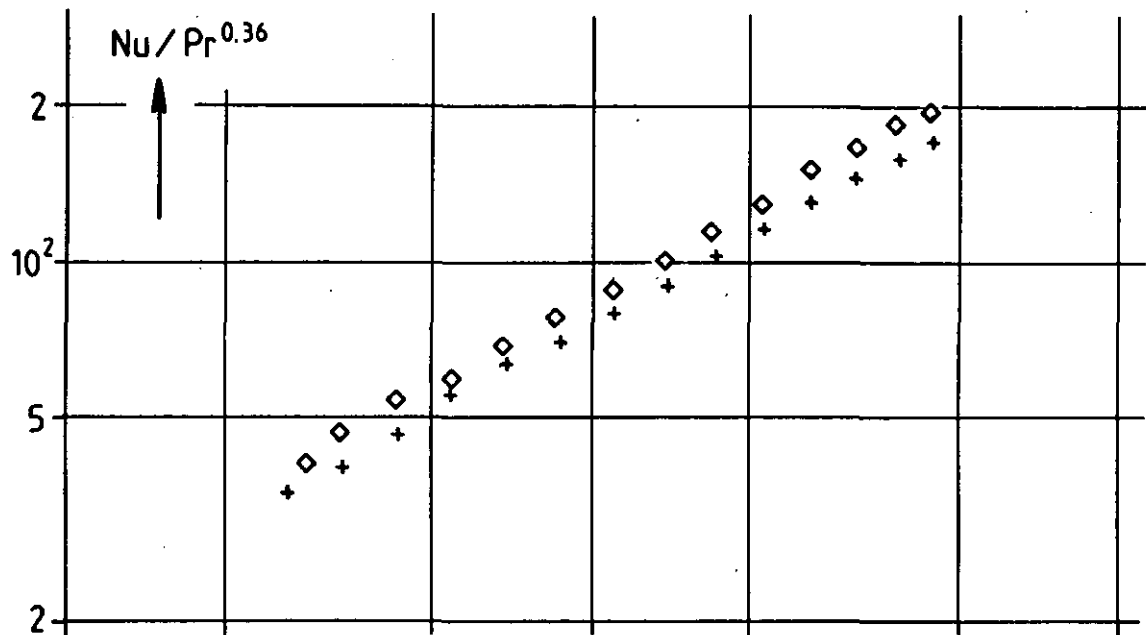
Abb.: 1



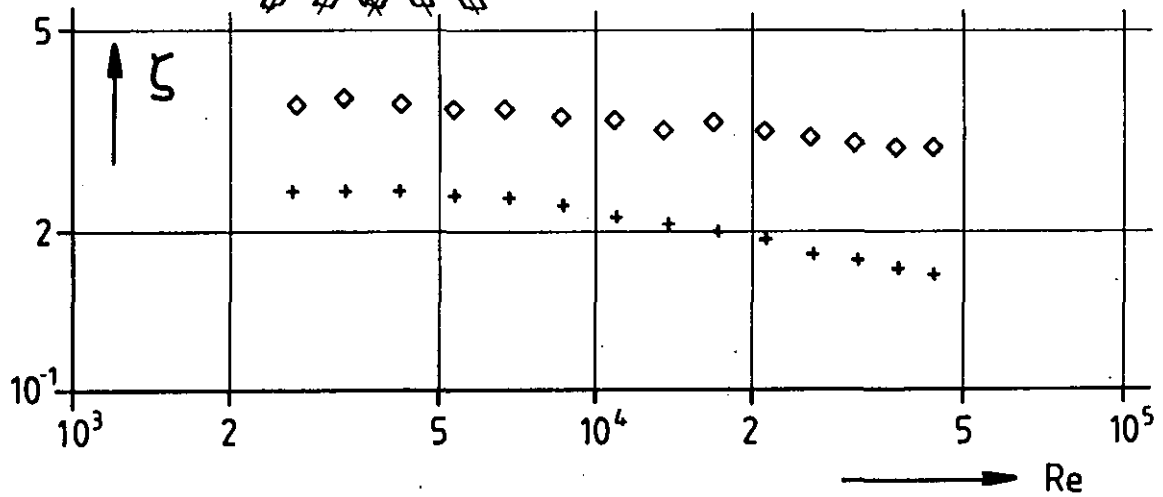


Sketch of flow through yawed tube banks  
with different tube arrangement

Abb.: 2

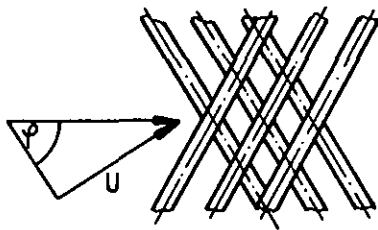
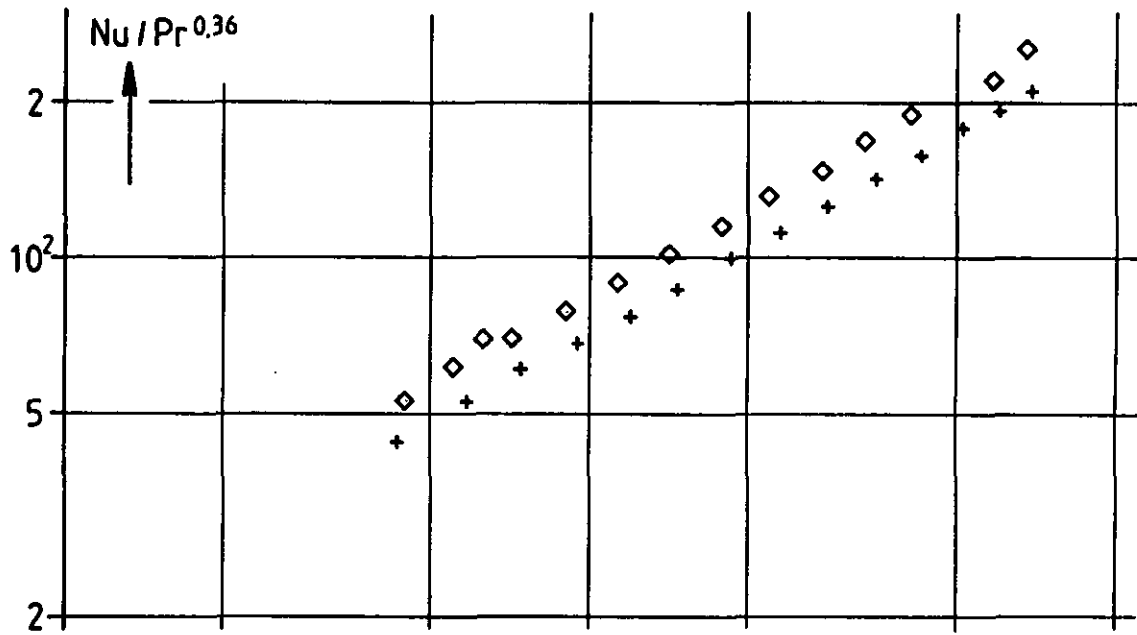


◇ parallel  
+ gekreuzt

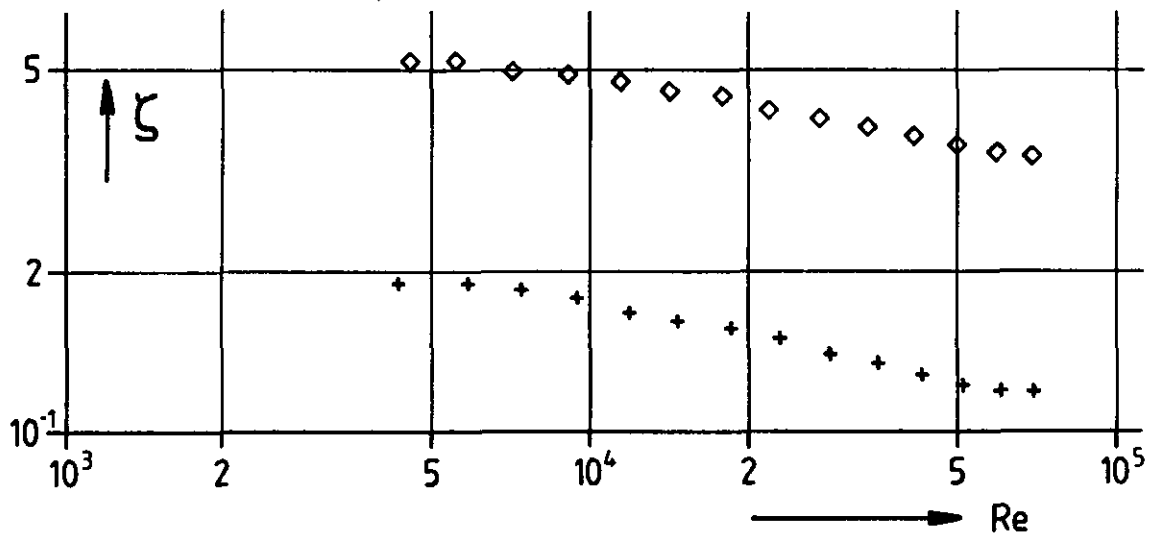


$$S_q \times S_l = 1,5 \times 1,5; \phi = 60^\circ$$

Abb.: 3

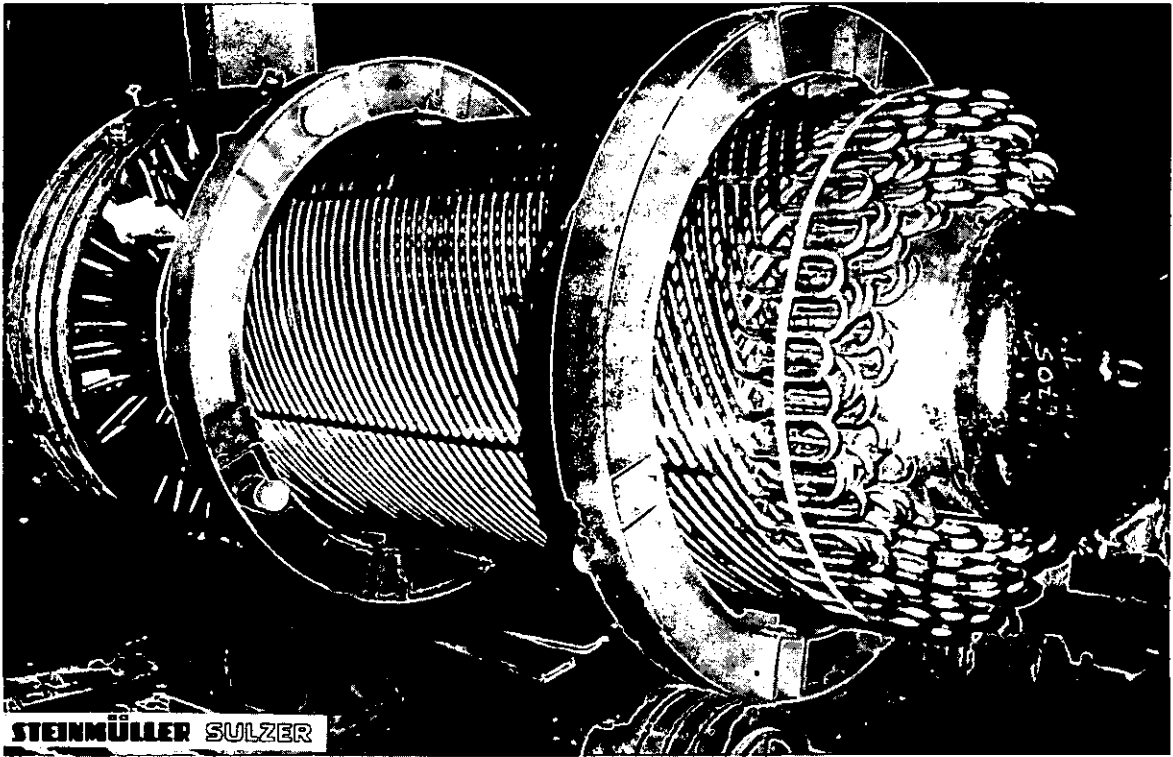


◇ parallel  
+ gekreuzt

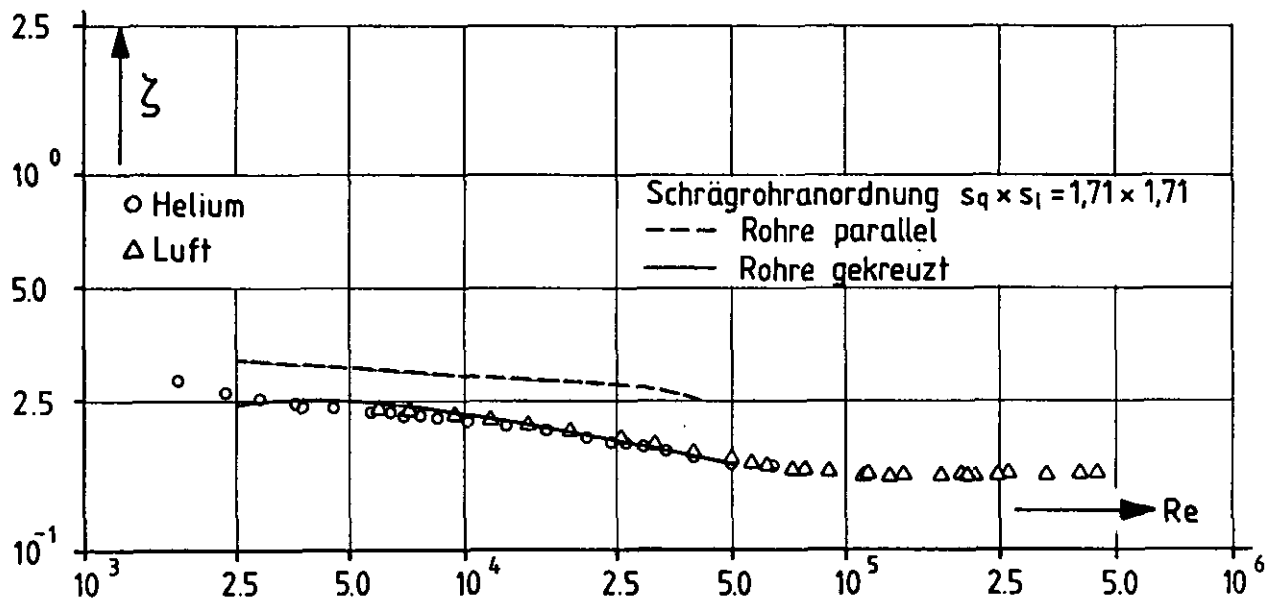
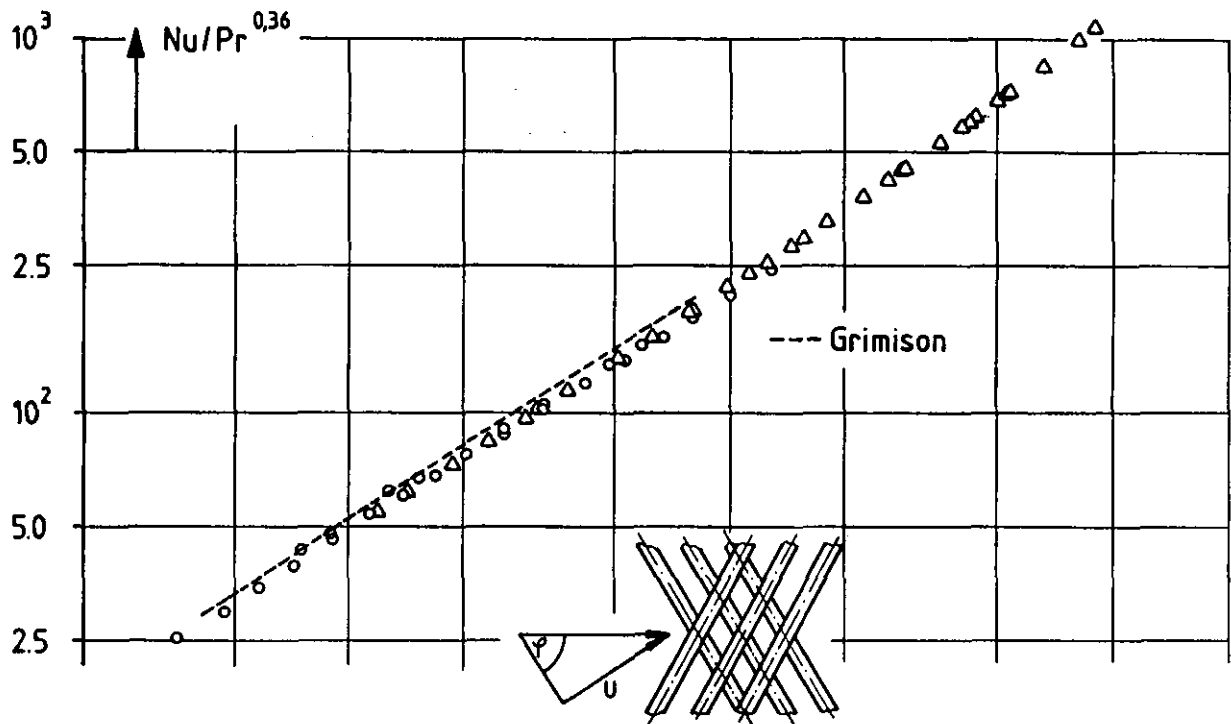


$$S_q \times S_l = 1,25 \times 1,25; \varphi = 60^\circ$$

Abb.:4



gegenseitig gewendelter Helium/Helium-Wärme-  
übertrager  $S_q \times S_l = 1,64 \times 1,48$ ;  $\varphi = 64,5^\circ$   
Abb.: 5



gegenseitig gewendelter Wärmeübertrager,  $\varphi = 64,5^\circ$

Abb.: 6

## Schwingungstechnische Auslegungsregeln für Wärmeübertrager im Hinblick auf Betriebssicherheit und Umweltbelastung

E. Heinecke

### Einleitung

In Kraftwerken und verfahrenstechnischen Anlagen haben Wärmeübertrager wichtige Funktionen. Mit ihrer Hilfe wird Wärme zwischen zwei Kreisläufen ausgetauscht. Die Rohrwände der Wärmeübertrager sind außerdem die Barriere zwischen zwei Fluiden, welche sich meist auf unterschiedlichem Druckniveau befinden, oder häufig chemisch miteinander unverträglich sind. In den letzten Jahrzehnten sind die Anlagengrößen, also die zu übertragenden Energiemengen stark angestiegen. Demzufolge wuchsen auch die geometrischen Dimensionen der Wärmeübertrager und die mantelseitigen Massenströme. Um möglichst kostengünstig zu arbeiten, werden kompakte Apparate bevorzugt. Für Rohrbündelwärmeübertrager, die in vielen Anlagen verwendet werden, bedeutet dies, daß die Rohrabstände so klein wie technisch machbar ist, gehalten werden. Im Sinne der Optimierung von Kostenaufwand und Erhöhung des Wärmeüberganges pro Volumeneinheit des Apparates ist dieses Vorgehen richtig.

Die Erfahrung zeigt jedoch, daß dadurch unvorhergesehene und unerwünschte Effekte entstehen: Durch den erhöhten Massendurchsatz auf der Mantelseite und die geringen Rohrabstände steigt die Gefahr, daß entweder die Rohre zu destruktiven mechanischen Schwingungen infolge instationärer Druckschwankungen im Fluid angeregt werden oder, dies gilt insbesondere für mantelseitig gasdurchströmte Apparate, daß akustische stehende Wellen sehr großer Intensität (bis zu 170 db) angefacht werden. Im ersten Fall entstehen Leckagen durch übermäßige mechanische Beanspruchung der Rohre, sie brechen in den Einspannstellen, werden in den Stützblechen zersägt, oder schlagen aneinander. So entsteht ein Kurzschluß zwischen dem mantel- und rohrseitigen Fluid. Bei akustischer Resonanz sind die Schallpegel unerlaubt hoch, die Behälterwände werden mechanisch überlastet, Meß- und Regelorgane werden gestört, und die Rohre werden zusätzlich mechanisch belastet.

Durch beide Effekte, mechanische oder akustische Resonanz, können also physikalische und chemische Effekte entstehen, die zum Abschalten der Anlage

zwingen und auch zu schweren umweltschädlichen Folgen führen können. Frage ist, ob man durch gezielte Modellversuche und durch Rechnung solche unerwünschten Betriebszustände bei Großapparaten vorhersagen und durch konstruktive Maßnahmen vermeiden kann. An zwei Beispielen wird gezeigt, welche Methoden erarbeitet und erfolgreich angewendet wurden.

### Akustische Resonanz

Akustische Resonanz kann vorhergesagt werden, wenn die dominierende Frequenz der strömungsinduzierten Druckschwankungen bei vorgegebener Rohranordnung bekannt ist. Die Frequenz  $f$  wird durch die Beziehung beschrieben, Gl. (1)

$$S = f \frac{D}{U} \quad (1)$$

Dabei ist  $D$  der Rohrdurchmesser,  $U$  die Geschwindigkeit im engsten Querschnitt zwischen den Rohren,  $S$  die Strouhalzahl, die für jede Rohranordnung experimentell ermittelt werden muß /1/, /2/, /3/.

Außerdem muß bekannt sein, welche akustischen Eigenfrequenzen der Wärmeübertragerbehälterraum hat. Wenn die Frequenz der strömungsinduzierten Schwingungen mit einer der akustischen Eigenfrequenzen des Behälterraumes übereinstimmt, kann akustische Resonanz auftreten. Aus dieser Bedingung folgt ein Modellgesetz, das durch Gl. (2) beschrieben wird,

$$S = \frac{1}{Re} \cdot \frac{c \cdot \rho \cdot D^2}{\eta} \cdot F_{p,q} \quad (2)$$

wobei  $Re$  = Reynoldszahl,  $c$  = Schallgeschwindigkeit des mantelseitigen Fluids,  $\eta$  = Zähigkeit des Fluids,  $F_{p,q}$  = Eigenwerte der akustischen Eigenfrequenzen. Für einen rechteckigen Behälterraum, (siehe /1/), ist die tiefste akustische Eigenfrequenz proportional zur größten Querabmessung  $l$  des Behälterraumes, so daß aus Gl. (2) folgt:

$$S = \frac{1}{Re} \cdot \frac{1}{2 \cdot l} \cdot \frac{c \cdot \rho \cdot D}{\eta} \quad (3)$$

In Abb. 1 ist dieser Zusammenhang für zwei Strouhalzahlen - die größere entspricht einer kompakten Bauweise - dargestellt. Wo die unter 45° geneigten Geraden die experimentell ermittelten Werte für  $S$  schneiden, passiert

akustische Resonanz. Dabei können der Grundton (tiefste Eigenfrequenz) oder Obertöne angeregt werden. Aus diesem Diagramm folgt, daß eine Vergrößerung der Behälterdimension  $l$  oder eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit  $U$  in jedem Fall dazu führt, daß akustische Resonanz wahrscheinlicher wird.

### Mechanische Resonanz

Die elastischen Rohre eines Wärmeübertragers werden durch instationäre Strömungskräfte angeregt in ihrer mechanischen Eigenfrequenz zu schwingen. Die Strömungskräfte wachsen um eine Größenordnung, wenn eine Grenzamplitude überschritten wird. In diesem Fall tritt eine Rückkopplung auf zwischen den elastischen Rohren und dem Fluid, und fast die gesamte Energie der instationären Kräfte ist auf die Eigenfrequenz der Rohre konzentriert. Man spricht wegen dieser Kopplung von Fluidelastizität. Der Kopplungsgrad ist abhängig von der Rohranordnung (fluchtend, versetzt) und steigt generell an, wenn man zu kleinen Rohrabständen, also zu kompakter Bauweise übergeht.

Frage ist, ob man ähnlich wie bei akustischer Resonanz durch Modellversuche das Verhalten eines Großapparates vorhersagen kann. Man gelangt zu einer Modellvorstellung, wenn man ein Rohr als gedämpften Einmassenschwinger betrachtet, wobei die anregenden äußeren Kräfte proportional zum Staudruck sind. Zugeführte und durch Dämpfung vernichtete Energie sind im Gleichgewicht. Daraus folgt Gl. (4).

$$\frac{K \cdot \rho \cdot U^2}{\frac{A}{D} \cdot m_{l,red} \cdot \omega_0^2 \cdot \frac{\Lambda}{\pi}} = 1 \quad (4)$$

Dabei ist:  $\rho \cdot U^2 / 2$  = Staudruck,  $A/D$  = relative Amplitude  $\Lambda$  = logarithmisches Dekrement,  $K$  = Proportionalitätsfaktor,  $\omega_0$  = Eigenfrequenz des Rohres,  $m_{l,red}$  = reduzierte Masse des Rohres.

Der Begriff der reduzierten Masse erklärt sich wie folgt: Die Masse eines Rohres ist nicht punktförmig als Einmassenschwinger konzentriert. Die kinetische Energie ist also gemäß der Biegelinie über die Rohrlänge verteilt, Für ein beidseitig eingespanntes Rohr, welches im Grundton schwingt, ist das Verhältnis von reduzierter Masse zur gesamten Rohrmasse = 0,41, siehe /4/.



Der Faktor K beschreibt den Zusammenhang zwischen der Schwingamplitude und den instationären Strömungskräften. Er kann nicht berechnet werden, sondern muß für jede Rohranordnung durch Versuche bestimmt werden, wobei, wie oben erwähnt, bei kompakten Rohrteilungen K sehr groß werden kann.

In Abb. 2 ist der durch Gl. (4) beschriebene Zusammenhang für eine quadratische fluchtende Teilung mit dem Teilungsverhältnis  $T = 1,44$  dargestellt. Man erkennt den steilen Anstieg der Schwingamplitude bei Überschreiten eines kritischen Staudruckes, was bei vielen Anlagen zu Schwingungsbrüchen geführt hat.

Aus Gl. (4) und Abb. 2 erkennt man den Einfluß der verschiedenen Parameter. Die relative Schwingamplitude steigt proportional zum Staudruck. Große Dämpfung, hohe Rohrmasse und Eigenfrequenz wirken günstig im Sinne der Verminderung der Schwingwege, und damit der mechanischen Beanspruchung.

Für die schwingungstechnische Auslegung von Wärmeübertragern ist wichtig zu wissen, welchen Einfluß Stützlänge, Rohrdurchmesser und Wandstärke haben. Man betrachtet dazu die Eigenfrequenz, Gl. (5).

$$\omega_0 = C \left( \frac{E \cdot I}{m_1 \cdot L^4} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$E$  = E-Modul,  $I$  = Trägheitsmoment,  $m_1$  = Masse pro Längeneinheit,  $L$  = Einspannlänge,  $C$  = Faktor, abhängig von der Einspannungsart, siehe /4/. Sei  $k = S/D$  die relative Wandstärke, so folgt aus Gl. (4) und Gl. (5) Gl. (6).

$$\frac{A}{D} = \frac{2 \cdot K \cdot \rho \cdot u^2 \cdot \left(\frac{L}{D}\right)^4}{(\pi \cdot C)^2 \cdot \frac{m_{l,red}}{m_1} \cdot f(k) \cdot E \cdot \Lambda} \quad (6)$$

Dabei ist  $f(k) = k (1-k) [1 - 2k + 2k^2]$

Man erkennt aus Gl. (6) die Einflüsse von Strömung, Schwingungsform und Massenbelegung, Geometrie und Materialeigenschaften. Das größte Gewicht hat die relative Länge  $L/D$ , weil sie mit der vierten Potenz wirkt. Dies wird meist bei der Projektierung von Großapparaten nicht beachtet.

## Einfluß des mantelseitigen Druckes auf das Schwingungsverhalten von Großapparaten

Modellversuche zu Rohrschwingungen wurden bisher nur in atmosphärischen Windkanälen, also bei  $p = 1$  bar durchgeführt. Viele Wärmeübertrager werden jedoch bei Drücken  $p \gg 1$  bar betrieben. Es ist also fraglich, ob die bei  $p = 1$  bar gewonnenen Ergebnisse auf höhere statische Drücke übertragbar sind. Anlaß zu dem Zweifel ist die Tatsache, daß die Federsteifigkeit von Gasen mit zunehmendem Druck ansteigt. Dadurch wird die Kopplung benachbarter Rohre stärker. Somit ist die Modellvorstellung, ein Rohr eines Wärmeübertragers isoliert von den Nachbarrohren als Einmassenschwinger zu betrachten, hinfällig. Erste Versuche in stagnierendem Gas bei Drücken  $1 \text{ bar} \leq p \leq 50 \text{ bar}$ , zeigen, daß das Rohrbündel sich bei steigendem Druck als Mehrmassenschwinger verhält, die Eigenfrequenz sinkt, und die Schwingungsamplituden steigen an. Beide Effekte führen wie aus Gl. (4) zu sehen ist, zu einer extrem erhöhten Schwingungsanfälligkeit. Versuche mit überlagerter Strömung und statischen Drücken  $1 \text{ bar} \leq p \leq 40 \text{ bar}$  sind in Vorbereitung.

## Zusammenfassung

Das Problem akutstischer und mechanischer Resonanzeffekte und deren Folgen für die Betriebssicherheit von mantelseitig querdurchströmten Wärmeübertragern in Kraftwerken und verfahrenstechnischen Anlagen wird beschrieben. Modellgesetze und Versuchsergebnisse werden mitgeteilt. Der Einfluß der verschiedenen Parameter, die bei der Auslegung von Großapparaten zu beachten ist, wird diskutiert. Weitergehende Versuche, die zum Ziel haben, bisher nicht untersuchte Einflußgrößen zu erfassen, werden beschrieben. Die Ergebnisse der Untersuchung sind bei großtechnischen Anlagen erfolgreich benützt worden, um kostspielige Schäden zu vermeiden oder zu beheben.

## Literatur

/1/ Heinecke, E.

Strömungstechnische und aeroakustische Erscheinungen in Zylindergittern. D83 (Diss. TU Berlin und Jül-815-RB, Dezember 1987)

- /2/ Mohr, K.H.  
Messung instationärer Drücke bei Queranströmung von Kreiszyklindern unter Berücksichtigung fluidelastischer Effekte  
D82 (Diss. TH Aachen) und Jül-1732, August 1981
- /3/ Michel, A.  
Messung von instationären Strömungskräften in fluchtenden und versetzten Rohrbündeln bei starren und schwingenden Rohren  
D82 (Diss. TH Aachen) und Jül-2038, Januar 1986
- /4/ Harris, C.M., Crede, E.C.  
Shock and Vibration Handbook, Mc Graw-Hill, New York.
- /5/ Heinecke, E.  
Übertragbarkeit von Modellversuchen zu fluidelastischen Rohrschwingungen auf Großapparate. Parameterstudie mit praktischen Beispielen. Interner Bericht IB-2-88, Institut für Reaktorbauelemente, KFA Jülich GmbH.

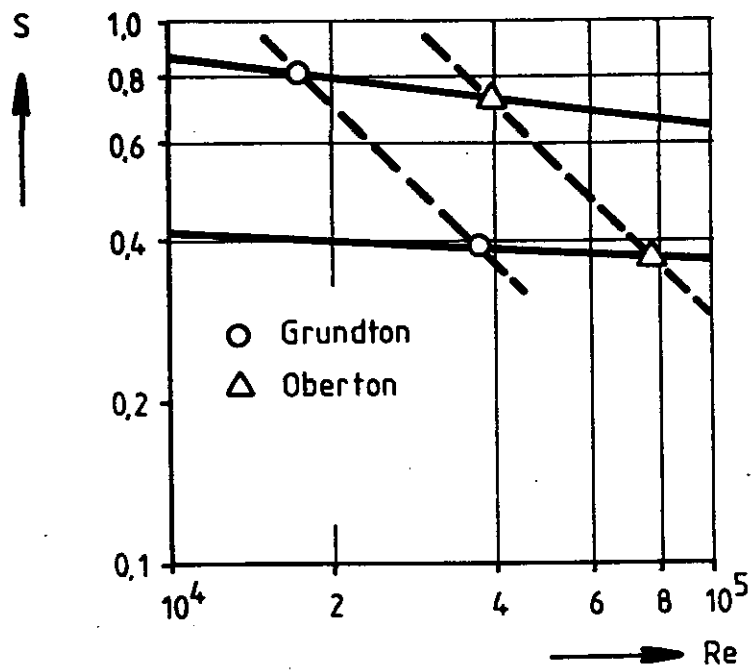


Abb. 1 Akustische Resonanz, Modellgesetz

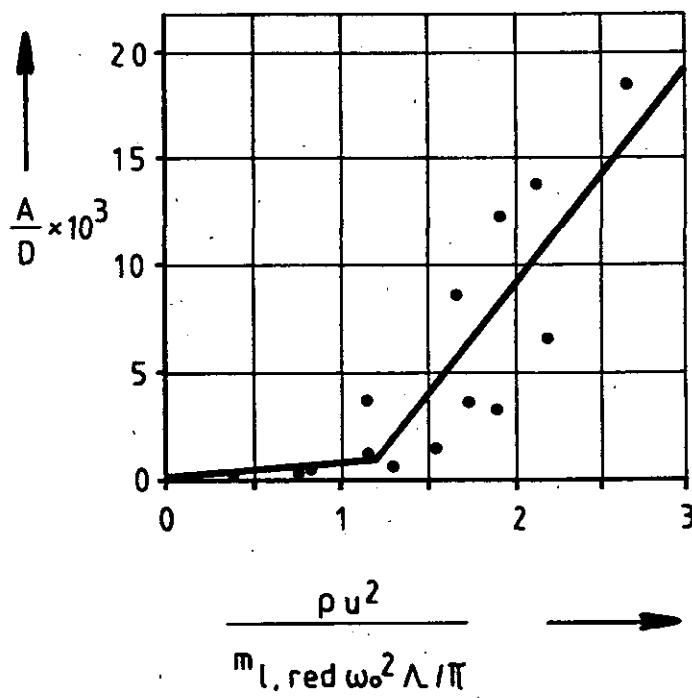


Abb. 2 Mechanische Resonanz, Modellgesetz

## Labor- und Reaktorversuche zur Ablagerung von Spaltprodukten im HTR-Primärkreislauf

P. Biedermann, B. Sackmann

### Einführung

Im Institut für Reaktorbauelemente (IRB) der KFA Jülich werden Untersuchungen zum Verhalten fester Spalt- und Aktivierungsprodukte im Primärkreislauf von Hochtemperaturreaktoren (HTR) bei Normalbetrieb und bei Störfall durchgeführt. Betrachtet werden hierbei diejenigen Spalt- und Aktivierungsprodukte, die das Brennelement bereits verlassen haben und sich als freie oder staubgebundene Aktivität im Kühlgas befinden. Während des Normalbetriebes lagern sie sich im Primärkreis ab. Bei Störfällen können sie aus dem Primärkreis freigesetzt werden. Für Genehmigungsverfahren sind also Kenntnisse über das Verhalten dieser Spalt- und Aktivierungsprodukte notwendig bezüglich Normalbetrieb (für Wartung, Inspektion, Reparatur) und Störfall (zur realistischen Beurteilung der aus der zu erwartenden Aktivitätsfreisetzung resultierenden Dosisbelastung der Umgebung). Ziel der Arbeiten des IRB zu diesen Vorhaben ist die Beschreibung der Transport, Ablagerungs-, Wechselwirkungs- und Freisetzungsvorgänge durch physikalische Modelle und die Erstellung einer Datenbank für nuklid- und werkstoffspezifische Modell-Parameter. Dabei werden theoretische Grundlagen und theoretische Auswertungen von der "Arbeitsgruppe Theorie" behandelt, wohingegen die Vorbereitung der zugehörigen Experimente, deren Betreuung während der Versuchsdurchführung sowie die Nachuntersuchungen im wesentlichen von der "Reaktortechnologischen Abteilung" (RTA) des Institutes durchgeführt werden.

Aus Zeitgründen wird in diesem Vortrag hauptsächlich über Reaktorexperimente berichtet. Eine erweiterte Fassung dieses Vortrages, die auch radioaktive Laborexperimente und die Nachuntersuchung von Experimenten einschließt, ist in Vorbereitung.

## Überblick über die Experimente

In enger Zusammenarbeit mit AVR führt das IRB Experimente zum Spaltproduktverhalten im HTR-Primärkreislauf durch. Einen Überblick über die Vorhaben gibt Abb. 1. Vertikal gelesen, sind die einem Untersuchungsschwerpunkt zugehörigen Experimente angeführt. Horizontal gelesen werden die Experimente in drei Gruppen unterteilt:

- Experimente unter radioaktiven Bedingungen im AVR-Reaktor ("inpile")
- Experimente unter radioaktiven Bedingungen im Labor ("out-of-pile")
- nichtradioaktive Laborexperimente

Bei den Untersuchungen zum Normalbetrieb von HTR's werden die beiden Vorhaben "Spaltproduktablagerung" und "Entfernung von Tritium aus dem Primärkreis" unterschieden. Die Inpile-Experimente zur Spaltproduktablagerung, VAMPYR-I und VAMPYR-II, werden ergänzt durch die beiden radioaktiven Laborexperimente SMOC und SCAFEX. Zur Entfernung von Tritium aus dem Primärkreis wird für die Dauer der Aussetzung des Staubexperimentes (s.u.) in dessen Strang 1 ein Tritiumfilter-Experiment betrieben. Vorversuche dazu wurden im nicht-radioaktiven Laborexperiment PERMA mit Deuterium durchgeführt.

Bei den Untersuchungen zum Störfallverhalten von HTR's werden die Vorhaben "Spaltproduktabtrag" sowie "Retardierung" und "Staubaktivität" sowie "Remobilisierung" unterschieden.

Untersuchungen zum Spaltproduktabtrag wurden sowohl mit dem Experiment SMOC (Druckentlastungsstörfallversuche) durchgeführt, als auch mit dem Dampf-leach-Experiment im Rahmen der Nachuntersuchung von SMOC-Experimenten.

Die Retardierung von Cäsium in Graphit wird im nicht-radioaktiven "Retardierungsexperiment" untersucht. Darüber wurde hier in einem anderen Vortrag berichtet. Die Staubaktivität wird in den Experimenten VAMPYR-I, VAMPYR-II und insbesondere dem "Staubexperiment am AVR" (Strang 1 und 2) untersucht, ergänzt durch das von AVR betriebene "Kaltgasfilterexperiment". Die Remobilisierung von Staub wird mit Hilfe sog. "Transientenexperimente" untersucht. Beim Durchfahren von Drehzahltransienten der AVR-Gebläse werden die Experimente VAMPYR-I, "Staubexperiment" und "Kaltgasfilter" als Staubsammelinstrumente eingesetzt.

### Versuchskreisläufe am AVR

Bevor die Inpile-Experimente im einzelnen vorgestellt werden, soll deren Anbindung an den AVR erläutert werden (Abb. 2). Bei allen Experimenten handelt es sich um geschlossene Kreisläufe: das Kühlgas (Primärgas) wird aus dem Reaktor abgezogen, strömt durch die einzelnen Experimentanordnungen und wird dann der Gasreinigungsanlage zugeführt oder von eigenen Kompressoren (nicht: VAMPYR-I) in den Reaktor zurückgefördert. Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal ist die Temperatur des Kühlgases an der jeweiligen Entnahmestelle des Reaktors: maximal 950 °C bei beiden VAMPYR-Experimenten, maximal 270 °C beim Staub bzw. Tritiumfilterexperiment. Für die Durchführung von Transientenexperimenten wird die Kühlgastemperatur im gesamten Primärkreis auf ca. 120 °C abgesenkt.

Als wichtige Ergänzung ist noch das von AVR betriebene Kaltgasfilterexperiment zu nennen. Weitere Einzelheiten zu diesen Experimenten sind der Abb. 2 zu entnehmen.

### VAMPYR-I

#### Zielsetzung und Merkmale

Die Heißgasentnahme am AVR "VAMPYR-I" ermöglicht die Bestimmung der spezifischen Konzentration fester Spalt- und Aktivierungsprodukte im heißen Primärgas des AVR in Abhängigkeit vom Brennelementbeschickungsprogramm und der Kühlgastemperatur. Weiter werden im Temperaturbereich unter 550 °C für ausgewählte Nuklide Ablagerungsparameter für verschiedene Werkstoffe bestimmt. In zunehmendem Maße gewinnt außerdem die Untersuchung des Einflusses von Staub auf die Ablagerung von Spalt- bzw. Aktivierungsprodukten an Bedeutung. Schließlich ist die Erprobung eines Spaltproduktfilters bei Betriebstemperaturen von 850 - 900 °C geplant.

Diese Arbeiten dienen der Bestimmung der Kühlgasaktivität des AVR bei Normalbetrieb sowie einer realistischen Beurteilung der zu erwartenden Aktivitätsfreisetzung bei Störfallbedingungen.

## Experimentbeschreibung

Der prinzipielle Aufbau des Experimentes ist in Abb. 3 dargestellt. Ein Thermoelement-Hüllrohr liegt in der oberen Lage des Deckenreflektors unterhalb des Dampferzeugers /4/. An der Spitze dieses Rohres befindet sich ein Schlitz, durch den das heiße Kühlgas abgesaugt wird. Nach außen, zum Schutzbehälter hin, wird das Thermoelementrohr durch zwei Kugelhähne verschlossen. Zum Einschleusen der Teststrecke wird im Schutzbehälter eine Transportflasche an die Kugelhähne angeflanscht. Durch die geöffneten Kugelhähne hindurch wird die Teststrecke (Testrohr mit Filter 1) in Experimentierposition gefahren, ohne daß der Druck des Kühlgases im Reaktorbehälter abgesenkt wird. Der Reaktor ist jedoch nuklear abgeschaltet. Die beiden Kugelhähne werden nach dem Einschleusen der Teststrecke wieder geschlossen.

Während der Experimentdurchführung wird heißes Kühlgas aus dem Core abgesaugt, durch Testrohr und Filter 1 geführt, anschließend durch ein Sicherheitsfilter 2 geleitet und dann der Gasreinigung zugeführt. Nach einer Betriebszeit von ca. 30 Tagen wird die Teststrecke aus der Experimentierposition entnommen und der Nachuntersuchung zugeführt.

Zur verbesserten Separierung von Stäuben sind im Filter 1 in Anströmrichtung gesehen mehrere Staubfilter hintereinander eingesetzt. Daran anschließend erfolgt die Filterung des Kühlgases mit versilbertem und einfachem Molekularsieb (Zeolith).

Während des Reaktorbetriebes ist insbesondere der in das Reaktorinnere weisende Teil des Testrohres einem sehr hohen Neutronenfluß ausgesetzt, so daß bestimmte Materialverunreinigungen (Fe, Co, Cr, Sc, Ta) aktiviert werden. Dies erschwert i. a. die gammaspektroskopische Analyse der gemessenen Spektren. Nähere Angaben zum Testrohr und zu den bisher eingesetzten Testmaterialien sind in Abb. 3 angegeben.



## VAMPYR-II

### Zielsetzung und Merkmale

Die Integraltests mit Hilfe des Ablagerungsloops am AVR "VAMPYR-II" dienen der Demonstration der Anwendbarkeit der Plate-out-Kenntnisse unter Betriebsbedingungen eines HTR. Durch Vergleich von Experimenten unterschiedlicher Dauer soll die Zeitabhängigkeit der Ablagerung von Spalt- und Aktivierungsprodukten überprüft werden. Weiter ist die Untersuchung des Staubeinflusses auf die Ablagerung von Interesse. Für Testrohrwand-Temperaturen oberhalb 800 °C sollen die Plate-out-Daten für verschiedene Werkstoffe vervollständigt werden. Ferner ist die Erprobung von Spaltproduktfiltern vorgesehen.

Mit diesen Arbeiten sollen also Kenntnisse und Daten unter realen Reaktorbedingungen abgesichert werden für Genehmigungsverfahren bezüglich Normalbetrieb und Störfall.

### Experimentbeschreibung

Die Entnahmestrecke für das heiße Kühlgas (Abb. 4) ist im Gegensatz zu VAMPYR-I in den Reaktor fest eingebaut. Eine doppelte Heißgasabsperrarmatur schließt die Entnahmestrecke nach außen ab. Im Schutzbehälter folgt nach einem gekrümmten Zwischenstück eine Heizstrecke, mit deren Hilfe die Temperaturverluste des Kühlgases auf dem Wege von der Entnahmestelle im Core bis zum Eintritt in die Teststrecke ausgeglichen werden sollen. An die Heizstrecke schließt sich die Baugruppe "Teststrecke" an, in der eine gestufte Isolation und eine zusätzliche Wasserkühlung einen Temperaturgradienten des Kühlgases von ca. 400 °C bewirken. Das aus dieser Baugruppe austretende Kühlgas strömt durch Heißgaskühler und Absolutfilter und wird dann über einen Kompressor zur Gasreinigung geleitet.

Entsprechend der Zielsetzung sind Experimente von 2,4 und 10 Monaten Dauer vorgesehen, bei denen die meßtechnische Bestimmung von abgelagerter Aktivität wegen fehlender Neutronenaktivierung der Teststrecke nicht beeinträchtigt ist.

Zum Be- und Entladen der Teststrecke wird nach dem Lösen der Flanschverbindung "Heizstrecke"/"Teststrecke" eine Transportflasche an die Baugruppe "Teststrecke" angeflanscht. Der Teststreckenwechsel erfolgt bei drucklosem

Zustand der entsprechenden Baugruppen.

Als Besonderheit der Teststrecke wird hier auf die konzentrische Anordnung von Rohr und Stab verwiesen. Während das Testrohr aus einem Stück besteht, ist der konzentrisch innenliegende Teststab in Hinsicht auf die spätere Nachuntersuchung aus einzelnen Segmenten aufgebaut, die mit Hilfe von Verbindungsstiften, Distanzscheiben und Distanzstiften zusammengehalten und im Testrohr zentriert werden. Dieser Anordnung kann wahlweise ein Staubfilter vorgeschaltet werden. Nachgeschaltet sind fünf Spaltproduktfilter.

### Staubexperiment

#### Zielsetzung und Merkmale

Mit dem "Staubexperiment am AVR" soll die Wechselwirkung von Staub- und Spaltprodukten im Primärgas eines HTR untersucht werden. Schwerpunkt ist hier die Unterscheidung von staubgebundener und freier Aktivität im Kühlgas. Weiter sollen neben Aktivität, Menge und Kornspektrum des Staubes dessen mögliche metallische und nichtmetallische Anteile separiert werden. Die vorgenannten Arbeiten sollen im Rahmen von Genehmigungsverfahren Kenntnisse über Wechselwirkungen von Staub mit Spaltprodukten sowie über fest an Staub gebundene Aktivitäten vermitteln, um bei Störfallbetrachtungen eine realistische Beurteilung des zu erwartenden Staub- und Aktivitätsaustrages bezüglich der Dosisbelastung der Umgebung abgeben zu können.

#### Experimentbeschreibung

Abb. 5 gibt einen schematischen Überblick über den Aufbau des Staubexperimentes. Das von der Entnahmestelle kommende Kühlgas wird in zwei parallele Stränge eingespeist. Wärmetauscher und Absolutfilter sind in beiden Strängen identisch, ebenso die Staubfilter SF1 und SF2 sowie die nachgeschalteten Spaltproduktfilter SPF1b und SPF2. Der wesentliche Unterschied ist der, daß in Strang 1 dem Staubfilter SF1 ein Spaltproduktfilter SPF1a vorgeschaltet ist. Dieses Filter fehlt in Strang 2! Da es mit hohem Abscheidewirkungsgrad die atomare Aktivität aus dem Kühlgas ausfiltern soll, ergibt ein Vergleich der Aktivitäten der in den Staubfiltern SF1 und SF2 gefundenen Stäube Aufschluß darüber, wieviel atomare Aktivität sich erst in den Staubfiltern auf dem Staub abgelagert hat.

Das zuströmende Kühlgas kann wahlweise aufgeheizt oder abgekühlt werden. Das abströmende Kühlgas wird über einen Kompressor der Gasreinigung zugeführt. Die Dauer der Einzelversuche beträgt wahlweise 6, 12, 18 oder 30 Tage. Nach jedem Versuch werden die Filterbehälter in drucklosem Zustand komplett gewechselt.

Der Aufbau der eingesetzten Filterbehälter für Spaltprodukt- und Staubfilter ist aus Abb. 5 zu ersehen. Deutlich ist (in Strömungsrichtung gesehen) die Hintereinanderschaltung von Spaltproduktfilter, Staubfilter und wiederum Spaltproduktfilter zu erkennen (Strang 1). Bei Strang 2 entfällt das vorgeschaltete Spaltproduktfilter SPF1a. Die Staubfilter in beiden Strängen sind aus wahlweise mehreren hintereinandergeschalteten Fuji-Sieben aufgebaut samt einem nachgeschalteten Quarzpapierfilter. - Neben einigen weiteren Filtereinbauten enthalten die Absolutfilter im wesentlichen Aktivkohle.

In Abb. 5 ist die Einbindung des Behälters, der mit SPF1a, SF1 und SPF1b bestückt ist, in Strang 1 beidseitig durch eine Markierung gekennzeichnet. An dieser Stelle wird ein entsprechend modifizierter Druckbehälter für das Tritiumfilterexperiment eingesetzt.

### Tritiumfilterexperiment

#### Zielsetzung und Merkmale

Das Tritiumfilterexperiment dient der Erprobung zweier Filterprototypen zur selektiven Entfernung von Tritium aus dem Primärgas eines HTR bei realem Reaktorbetrieb. Damit soll ein Verfahren ertüchtigt werden zur sicheren Unterschreitung der zulässigen  $H_3$ -Konzentration im PNP-Produktgas unter die Vorgabe der Strahlenschutzverordnung bei Normalbetrieb und Störfall.

Die hier eingesetzten Filterpatronen beruhen auf einem Prinzip abgestützter Palladium-Silberfolien. Die prinzipielle Funktion des Konzeptes wurde im Laborversuch mit Deuterium nachgewiesen.

## Experimentbeschreibung

Die Erprobung der Tritiumfilter erfolgt in einem Druckbehälter, der in Strang 1 des Staubexperimentes anstelle des Behälters mit den Spaltproduktfiltern SPF1a, SPF1b und dem Staubfilter SF1 eingesetzt wird (Abb. 6). Die Einbauten des Druckbehälters mit dem 28er-Rohrbündel sind in der unteren Bildhälfte dargestellt, zusammen mit ihrer äußern Beschaltung.

Von dem dem Tritiumfilter zugeführten Hauptgasstrom (Primärstrom) wird ein Sekundärstrom abgezweigt. Der Primärgasstrom wird durch ein Rohrbündel mit 28 Palladium-Silberrohren und durch ein Staubfilter innerhalb des Filterbehälters geführt. In den Sekundärstrom wird, nachdem dieser mit Hilfe eines Staubfilters gereinigt worden ist, Wasser injiziert. Danach wird der Sekundärstrom zunächst über einen Katalysator und dann im Gegenstrom durch das Rohrbündel an den Palladium-Silberrohren vorbeigeleitet. Aufgrund des Konzentrationsgefälles permeiert Tritium aus dem Primärstrom in den Sekundärstrom. Das mit Tritium angereicherte Wasser wird schließlich in speziellen Probenbehältern gesammelt und der Nachuntersuchung zugeführt.

## Versuchsergebnisse

Die hier vorgestellten Experimente befinden sich in sehr unterschiedlichen Durchführungsstadien, so daß eine geschlossene Darstellung von Versuchs- bzw. Nachuntersuchungsergebnissen nicht möglich ist. Deshalb sollen hier lediglich einige ausgewählte Ergebnisse aus Reaktorexperimenten vorgestellt werden.

## Ablagerung

Aus der Nachuntersuchung fallen nuklidspezifische Aktivitätswerte für die Komponenten (z. B. Testrohr, Teststab, Filter) der zerlegten Teststrecken an. Ein punktwises Auftragen der Aktivitätswerte der einzelnen Testrohr- bzw. Teststabsegmente über der Länge der Teststrecke ergibt dann ein Aktivitätsprofil.

Ein erstes Beispiel ist dem Experiment VAMPYR-I/V40 entnommen. Auf der Ordinate in Abb. 10 ist für eine Auswahl von Isotopen die Flächenbelegung der Aktivität über der Testrohrlänge aufgetragen. Die Skalierung der Rohr-

wandtemperatur  $\vartheta_w$  (strichpunktierte Linie) befindet sich an der rechten Diagrammseite. Die Abszisse beschreibt (entgegen der Strömungsrichtung) die Testrohrlänge. Das Primärgas tritt von links in das Testrohr bei  $l = 240$  cm ein.

Die Temperatur  $\vartheta_w$  der Testrohrwand fällt von ca.  $830 - 850$  °C an der Testrohrspitze auf ca.  $75$  °C am Testrohrende ab.

In Abb. 10 sind die gemessenen Aktivitätsprofile verschiedener Spalt- und Aktivierungsprodukte dargestellt. Dabei muß unterschieden werden zwischen Radioisotopen, die über Transportvorgänge aus dem Core mit dem Kühlgas an den Nachweisort gelangt sind (Cs-137, Ag-110m, J-131) und solche, die direkt am Nachweisort entstanden sind (Cr-51).

Bei Cs-137 und Ag-110m gibt das gemessene Profil die Überlagerung von an der Teststreckenoberfläche abgelagerter atomarer und staubgebundener Aktivität, Aktivität einer ggf. vorhandenen Oxydschicht und von ggf. ins Testrohrmaterial eindiffundierter Aktivität wieder.

Beim Isotop J-131 ist die Temperaturabhängigkeit deutlich ausgeprägt: Für Rohrwandtemperaturen unterhalb  $450$  °C nimmt die Ablagerung im Bereich eines steilen negativen Temperaturgradienten um mehr als eine Größenordnung zu.

Einen völlig andersartigen Aktivitätsverlauf zeigt das Isotop Cr-51. Es wird durch Neutronenaktivierung der Materialverunreinigung Cr-50 ortsfest im Testrohrwerkstoff erzeugt. Das Aktivitätsprofil des Cr-51 bildet somit über einen weiten Bereich der Teststrecke den lokalen thermischen Neutronenfluß ab.

Ein weiteres Beispiel für Ablagerungsprofile stammt aus dem ersten abgeschlossenen VAMPYR-II-Versuch.

Abb. 11 zeigt den Verlauf der Ablagerung der Isotope Cäsium und Silber auf Testrohr und Teststab des Experimentes VAMPYR-II/V01. Auch hier ist wieder die Flächenbelegung der Aktivität über der Testrohrlänge aufgetragen. Die Rohrwandtemperatur ist am rechten Bildrand skaliert. Die Abszisse bildet wiederum die Testrohrlänge ab, diesmal in Strömungsrichtung des Kühlgases, das von links in die Teststrecke eintritt.

Bei Isotop Ag-110m zeigen die Ablagerungsprofile auf Rohr und Stab im mittleren Teststreckenbereich eine deutliche Verschiebung entsprechend der unterschiedlichen Temperaturen von Rohrwand und Teststab. Dennoch ist eine eindeutige Temperaturabhängigkeit der Ablagerung nicht erkennbar.

Die Ablagerung des Isotops Cs-137 auf Testrohr und Teststab bleibt fast

über die gesamte Länge konstant. Lediglich die Ablagerung auf dem Testrohr steigt zum Testrohrende deutlich an. Mit den Erfahrungen aus VAMPYR-I könnte dieser Profilanstieg auf die Anwesenheit von Staub hindeuten. Eine Temperaturabhängigkeit der Ablagerung ist auch hier nicht zu erkennen. Die Diskussion über die Bewertung der Meßergebnisse dauert an.

### Staub

Aus den bisher durchgeführten Nachuntersuchungen von AVR-Staub lassen sich zwei wesentliche Aussagen ableiten:

1. entgegen bisheriger Auffassung läßt die Fraktionierung von Stäuben aus dem heißen Kühlgas des AVR mit Hilfe sog. Fuji-Siebe wegen Agglomeration keine Aussage über tatsächlich vorhandene Siebfractionen zu.
2. bei allen untersuchten Proben liegt das Maximum der Verteilung für Feinstaub bei Korngrößen um  $1\text{ }\mu\text{m}$ .

Ein Beispiel für eine typische Korngrößenverteilung von AVR-Feinstaub, wie sie auf dem  $40\text{ }\mu\text{m}$ -Fuji-Sieb im Experiment VAMPYR-I/V41 als Ergebnis des Transientenexperiments T2 gefunden wurde, zeigt Abb. 12 (Diese Korngrößenverteilung wurde noch manuell ermittelt!).

Auf der Ordinate ist (linear) die differenzielle Häufigkeit  $q(d)$  bestimmter Korngrößenklassen aufgetragen bzw. deren Summenfunktionen  $Q(d)$ , auf der Abszisse der Teilchendurchmesser  $d$  in logarithmischem Maßstab. Das Maximum der Verteilung liegt hier bei etwa  $0.6\text{ }\mu\text{m}$ , der 50 %-Wert der Summenfunktion ebenfalls bei etwa  $0.6\text{ }\mu\text{m}$ .

Als Beispiele für Grobstaub, der bei der Nachuntersuchung der Staubfilter aus dem "Staubexperiment" gefunden wurde, mögen die Bilder 1 - 4 dienen. Es handelt sich dabei allerdings um extreme Beispiele für groben Staub, wie er auch im Kühlgas des AVR aufgefunden wird, keineswegs jedoch um typischen AVR-Staub!

Bild 1 zeigt eine Kohlenstofffaser mit einem Durchmesser von ca.  $20\text{ }\mu\text{m}$  und einer Länge von ca.  $350\text{ }\mu\text{m}$ . Bild 2 zeigt zwei Agglomerate von "feineren" Staubkörnern. Die größte Ausdehnung des größeren Agglomerates beträgt ca.

200  $\mu\text{m}$ . Bild 3 zeigt ein Korn, bei dem Graphit deutlich mit metallischen Anteilen durchsetzt ist. Die Länge der Korns beträgt ca. 1500  $\mu\text{m}$ , seine Breite ca. 300 - 600  $\mu\text{m}$ . Bild 4 zeigt schließlich eine rein metallische Ausscheidung. Der Durchmesser des "Tropfen" beträgt ca. 150  $\mu\text{m}$ .

### Schlußbetrachtung

Jedes der vorgestellten Experimente zum Spaltproduktverhalten im HTR-Primärkreislauf bedingt einen sehr großen Aufwand an Arbeitseinsatz und Materialkosten. Experimentaufbau und -Durchführung müssen den Regeln für kerntechnische Anlagen genügen. Umfangreiche Prüfungen und besondere Sicherheitsbetrachtungen zu diesen Experimenten sind notwendig. Vom Beginn der Planung eines solchen Experimentes bis zu dessen Durchführung vergehen oft mehrere Jahre. An den einzelnen Experimenten waren und sind direkt oder indirekt viele Mitarbeiter des IRB, anderer KFA-Einrichtungen, des AVR, des TÜV und der Genehmigungsbehörde beteiligt. Ihnen allen soll an dieser Stelle für ihre Mitarbeit zum Gelingen der Experimente herzlich gedankt werden.

		NORMAL-BETRIEB		STÖRFALL	
		SPALTPRODUKT- - ABLAGERUNG	TRITIUM- - ENTFERNUNG	SPALTPRODUKT- - ABTRAG - RETARDIERUNG	STAUB- - AKTIVITÄT - REPOBILISIERUNG
		Vampyr-I			Vampyr-I
Inpile	(1)	Vampyr-II			(Vampyr-II)
					Transienten- experiment
					Staubexperiment - Strang 1 - Strang 2
			Tritium-Filter- experiment (in Staubexperiment - Strang 1)		Staubexperiment - Strang 2
Out-of-pile	(2)	SPOC (Cs-134) +)		SPOC / DES +)	ergänzt durch : AVR - KGF
		SCAFEX (Ag-110m)			
				Dampfleach- experiment	
Inaktiv			PERMA +) (Deuterium) (3)	Retardierungs- experiment (Cäsium) (4)	
<p>(1) ... (4) Versuchseinrichtungen bei: (1) = AVR, (2) = IRB/RTA, (3) = IRB/Prozedurwärme, (4) = IRB/Thermodynamik +) Versuche abgeschlossen</p>					
KFA-IRB RTA					Abb. 1

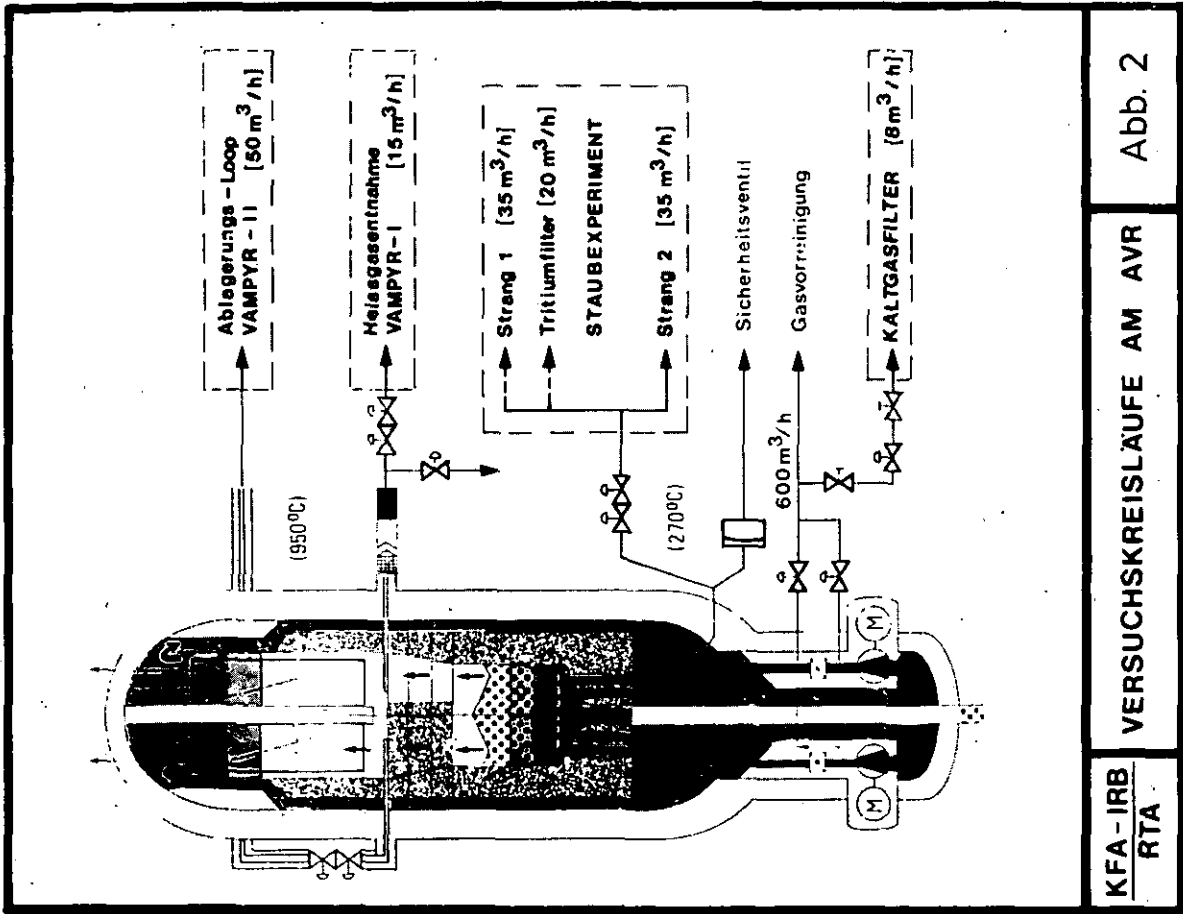
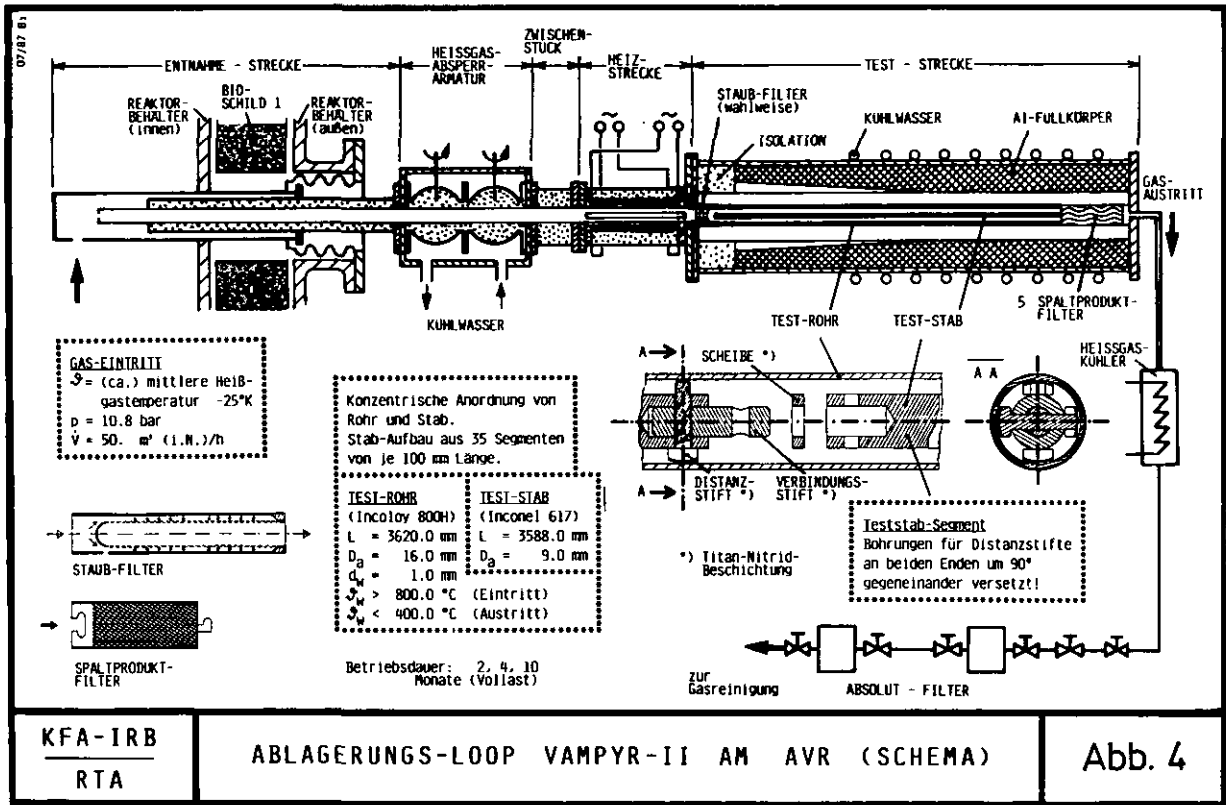
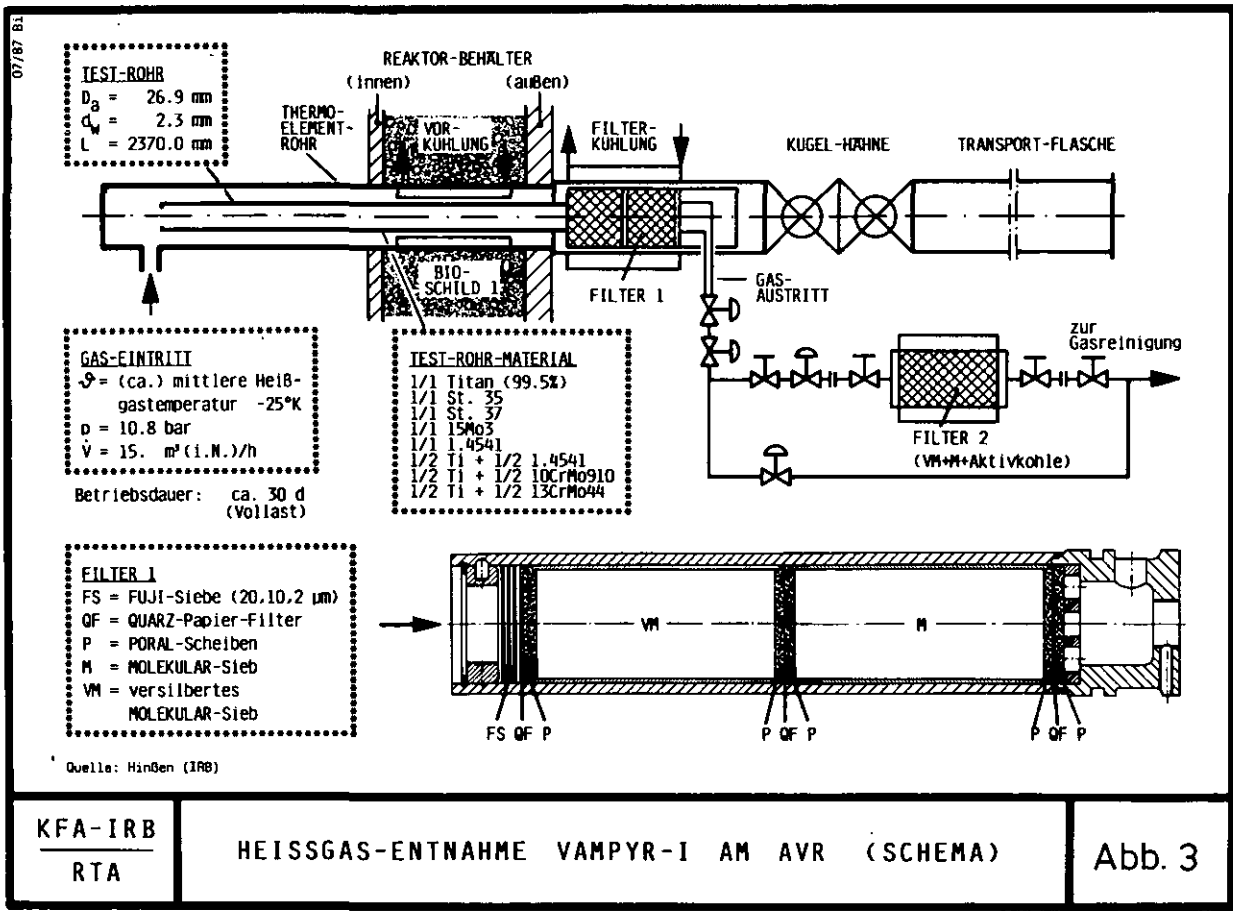


Abb. 2

VERSUCHSKREISLAUFE AM AVR

KFA-IRB  
RTA





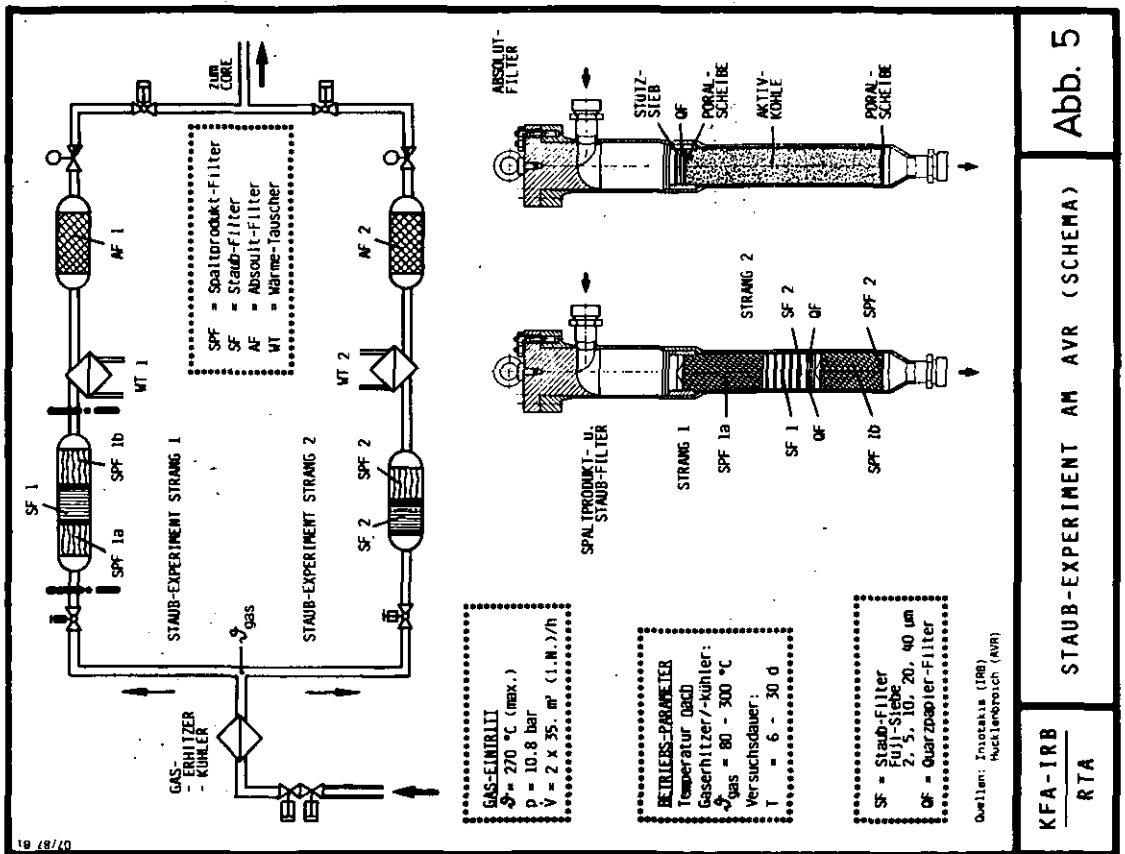
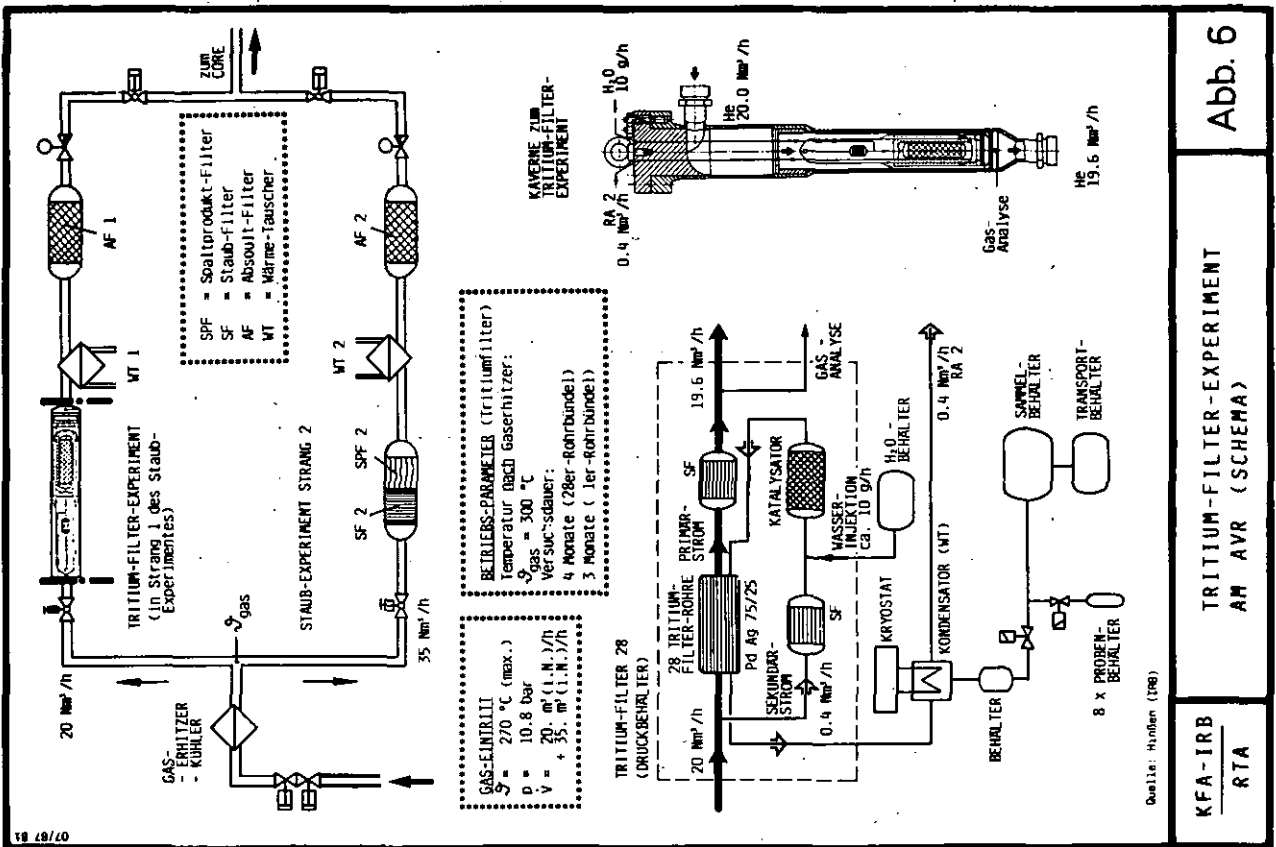




Bild 1

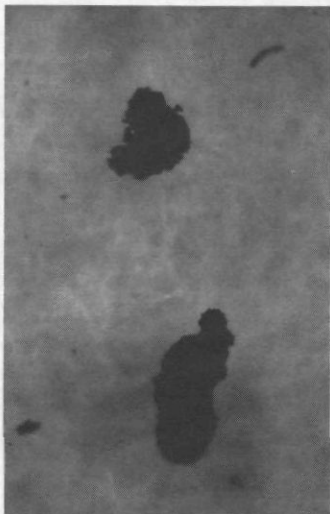


Bild 2

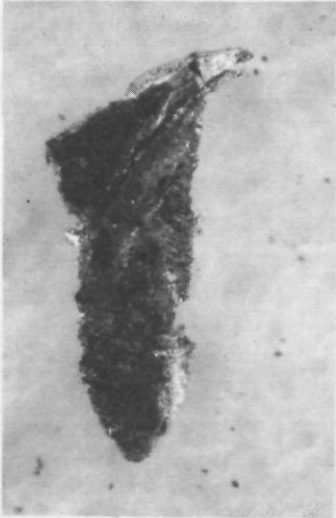


Bild 3

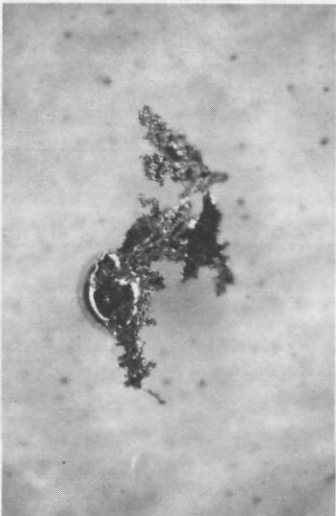
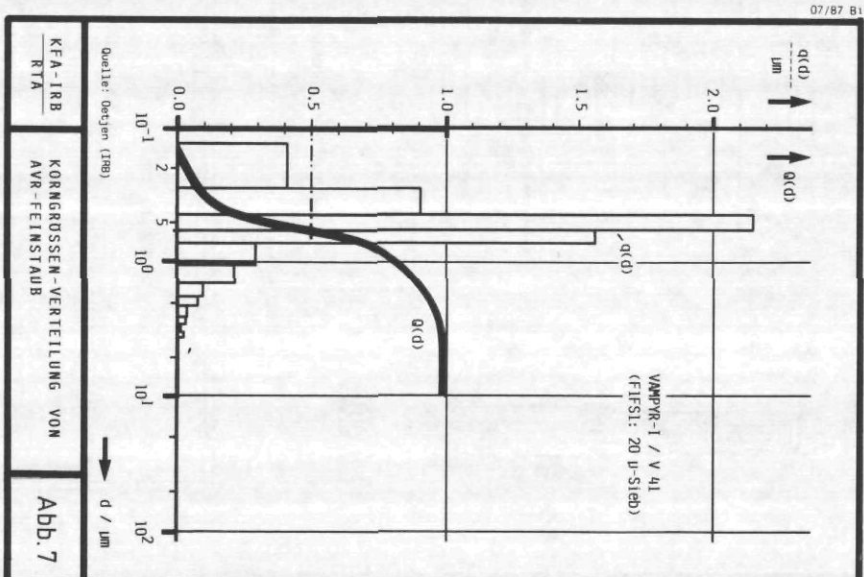
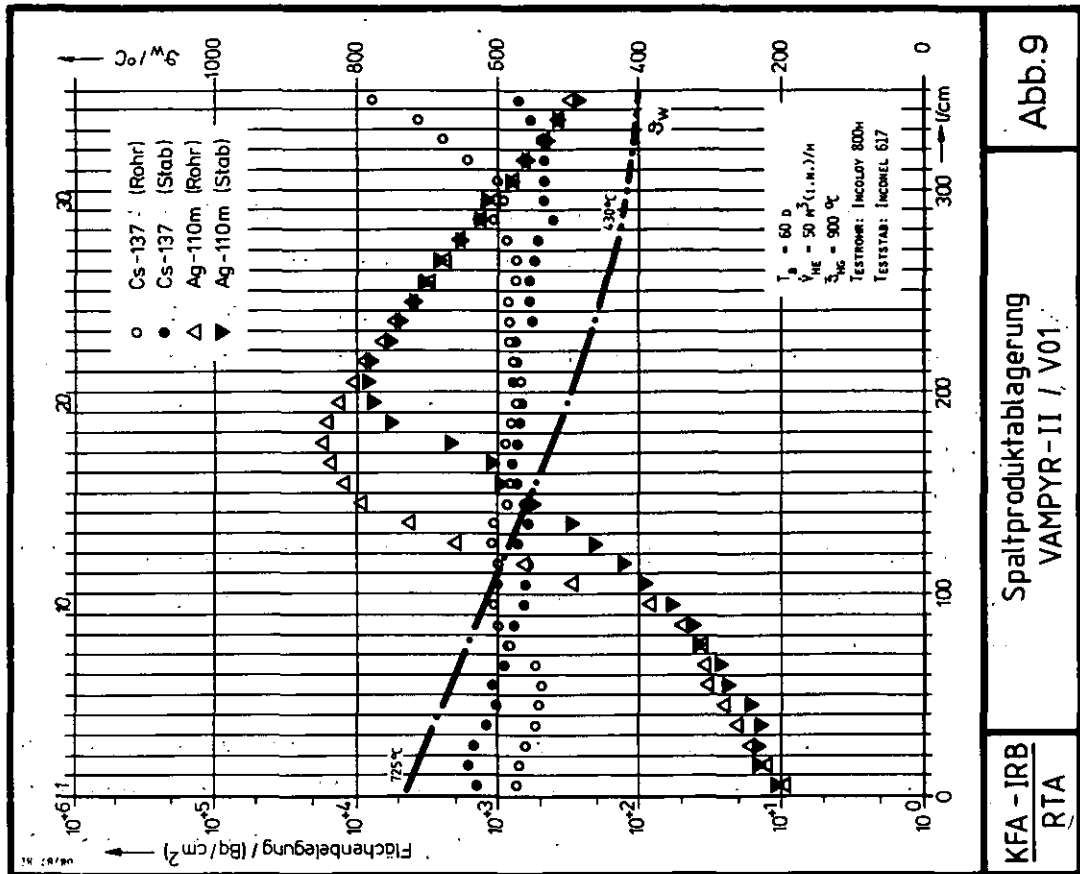
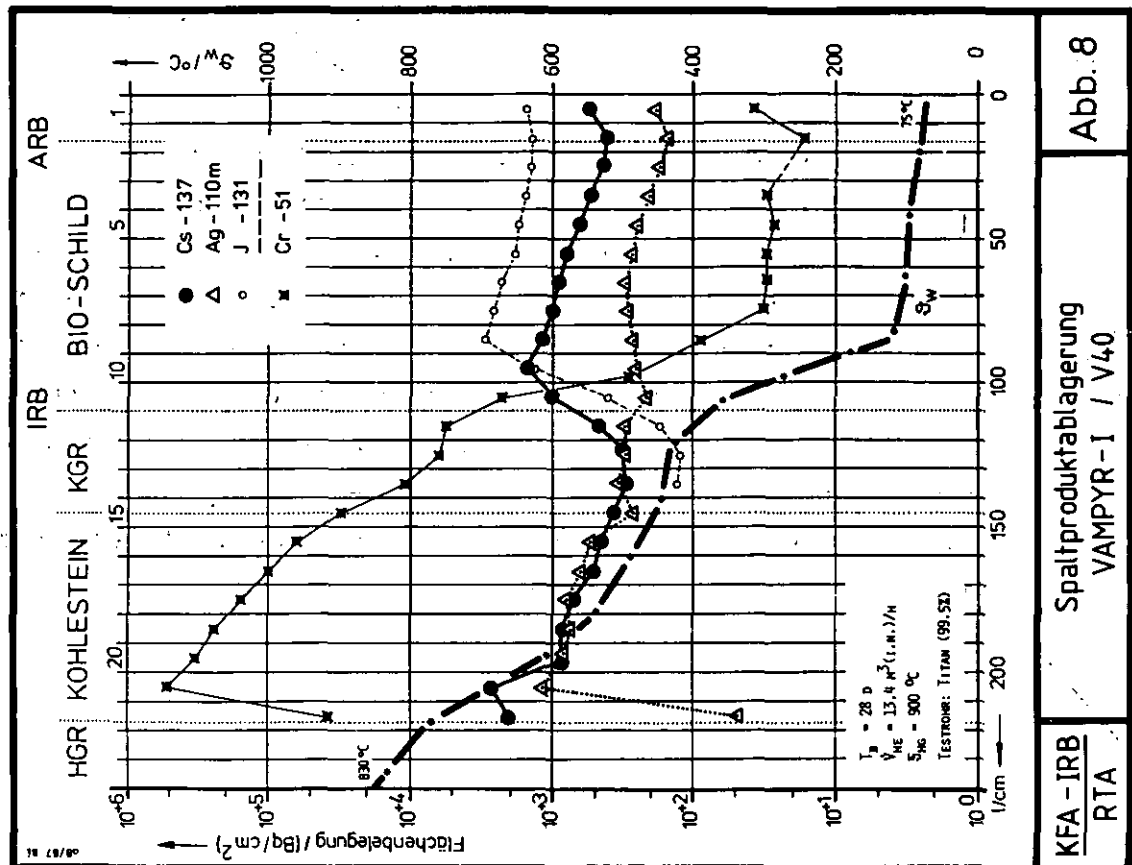


Bild 4





## Sicherheitsaspekte bei der Betrachtung von HTR-Störfällen

H. Barthels, N. Iniotakis

### Einleitung

Zur Bewertung des Gefährdungspotentials und der radiologischen Konsequenzen, die sich bei HTR's aus Auslegungs- und hypothetischen Störfällen für das Personal, die Umwelt und für die Bauteile ergeben könnten, ist die Kenntnis des Temperaturverlaufs, der Transport- und Ablagerungsvorgänge von Spaltprodukten im Primärkreislauf, insbesondere in den Graphitstrukturen des Reaktors, erforderlich.

Seit vielen Jahren beschäftigt sich das IRB mit einem umfangreichen experimentellen und theoretischen Programm, das sich an den Erfordernissen für die Sicherheit von HTR-Anlagen orientiert.

Im Vordergrund stehen Erstellung, Überprüfung und Optimierung von Rechenmodellen und Rechenprogrammen für die thermohydraulischen Vorgänge und für die Transport- und Wechselwirkungsvorgänge der Spaltprodukte in sensitiven Bereichen des HTR, sowie die Ergänzung und Absicherung der erforderlichen Daten. Die Arbeiten sollen die Sicherheitseigenschaften von HTR-Anlagen, insbesondere bei Auslegungs- und hypothetischen Störfällen, weiter erhärten.

Inwieweit die in Rechenprogrammen verwendeten Modell-Gleichungen und Annahmen die Vorgänge richtig beschreiben, kann nur durch den experimentellen Vergleich überprüft werden. Es wurden daher Versuchsanlagen erstellt, in denen die Vorgänge möglichst ähnlich wie im Primärkreislauf eines HTR ablaufen. Durch den direkten Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Größen können Rückschlüsse auf die Eignung der verwendeten Modell-Ansätze und nicht zuletzt der verwendeten numerischen Verfahren gewonnen werden. Letztendlich sollen belastbare Aussagen über eine allgemeingültige Anwendung der Rechenprogramme gewonnen werden. Dies wird verdeutlicht am untersuchten Beispiel eines Core-Aufheizstörfalles.

### Untersuchung von hypothetischen Core-Aufheizstörfällen

Bei einem hypothetischen Coreaufheizstörfall steigt die Temperatur im Core-Bereich an. Als Folge einer temperaturbedingten, verstärkt auftretenden Diffusion durch die Brennstoffhülle und eines partiellen Brennstoff-Partikelbruchs werden radioaktive Spaltprodukte aus den Brennelementen in das Kühlgas freigesetzt.

Zur Bewertung des Gefährdungspotentials und der radiologischen Konsequenz eines solchen Störfalls für die Umwelt sind fundierte und unter repräsentativen Störfallbedingungen abgesicherte Kenntnisse über:

- Den Strömungs- und Temperaturverlauf im Core-Bereich.
- Die Transport- und Wechselwirkungsvorgängen der Spaltprodukte in den Brennstoffhüllschichten, den Graphitstrukturen und generell im Primärkreis erforderlich.

Hierzu werden bzw. wurden im IRB Untersuchungen durchgeführt:

- Zur Thermohydraulik des Cores und des Primärkreislaufes.
- Zum Rückhaltevermögen der Graphitstrukturen, z.B. des Deckenreflektors, hinsichtlich der Spaltproduktfreisetzung.

### Thermohydraulische Untersuchungen

Da im Störfall die zuverlässige Nachwärmeabfuhr (NWA) des HTR ein besonders sicherheitsrelevantes Problem darstellt, konzentrieren sich die Untersuchungen auf die NWA mit der natürlichen Konvektionsströmung im Core und im Primärkreislauf mit den wärmetauschenden Komponenten. Die begleitenden Rechnungen werden mit der Programmversion THERMIX-CRAY in Zusammenarbeit mit dem ISF durchgeführt. Dabei wird insbesondere das Zusammenwirken des core-internen und -externen Programmteils im Vergleich mit dem Experiment getestet.

Bei einem hypothetischen Ausfall des NWA-Systems kann sich im Primärkreis eines HTR bei 'Reaktor unter Druck' eine Naturkonvektion ausbilden, die die Nachwärme aus dem Core in die kälteren Reaktorbereiche transportiert. Durch die Strömungsumkehr wird allerdings die kalte Seite des Primärkreises ther-

misch belastet. Diese Strömungsumkehr kann bei geeigneter konstruktiver Gestaltung des NWA-Loops und hochangeordnetem NWA-Wärmetauscher vermieden werden, so daß die Nachwärme passiv mittels Naturkonvektion in normaler Strömungsrichtung über die Wärmesenke abgeführt wird. Zur Eingrenzung der dafür erforderlichen thermodynamischen Bedingungen des NWA-Loops wurde das neue Naturkonvektionsexperiment aufgebaut, in dem verschiedene Strömungsbedingungen und Höhenpositionen der Wärmesenke simuliert werden können. Das Experiment dient der weiteren Optimierung und Absicherung des passiven NWA-Konzeptes beim HTR.

Zur Untersuchung dieser Vorgänge wurde eine Versuchsanlage gebaut (Abb. 1), in der die natürliche Loopzirkulation, ausgehend von einer Kugelschüttung als Wärmequelle, über ein geschlossenes Rohrleitungssystem zu einem Wärmetauscher (WT) und wieder zurück zur Schüttung läuft. Zwischen Quelle und Senke kann eine anfängliche Temperaturdifferenz von 280 °C eingestellt werden. Variiert wird der Systemdruck ( $p$  40 bar) und die geodätische Anordnung des WT in 4 Positionen.

Die Kugelschüttung und ein Teil des Rohrleitungssystems werden mittels Zwangskonvektion durch den Turbo-Verdichter über den Elektroerhitzer auf das gewünschte Temperaturprofil ( $T$  300 °C) gebracht. Nach Erreichen der Temperatur werden Verdichter und Erhitzer abgeschaltet, vom Kreislauf über Ventile getrennt und der Loop-Kreislauf zum WT für die natürliche Zirkulation geöffnet. Eine zusätzliche Wärmesenke kann auch über den Seitenkühler der Schüttung eingeschaltet werden. Von diesem Zeitpunkt an wird das transiente Temperaturfeld der Schüttung, die Kreislauftemperaturen und der Durchsatz mit Bestimmung der Richtung gemessen. Zur Erfassung der relativ kleinen Durchsätze (max. 0,07 kg/s Helium und 0,6 kg/s Luft) in einer Rohrleitung NW 100 wurde zur Vermeidung von großen Druckverlusten die Viertelkreisdüse mit einem Micromanometer zur Erfassung kleinster Wirkdrücke im Bereich  $10^{-2}$  bis 4 mbar installiert. Zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit (0 - 3 m/s) und -Richtung wurde ein Flügelrad eingesetzt. Zur Messung des Temperaturfeldes innerhalb der Schüttung sind ca. 80 Kugeln mit Thermoelementen bestückt.

Die Abb. 2 zeigt den Verlauf der transienten Loop-Zirkulation unter der Bedingung der natürlichen Konvektion bei unterschiedlich angeordneten Wärmesenken in Pos. 1 oder 4. Ausgangspunkt ist eine auf 300 °C aufgeheizte Kugelschüttung mit einem heißen und einem kalten Rohrleitungsstrang zum WT

bei einem Systemdruck von ungefähr 37 bar mit den Gasen Luft und Helium. Die geodätische Anordnung ist, wie die Abb. 2 zeigt, von großem Einfluß auf die zirkulierende Gasmasse und auf die Umlaufrichtung.

In Pos. 1 bleibt die ursprüngliche Richtung der Betriebsströmung erhalten, während in Pos. 4 die Umlaufrichtung von Anfang an umgekehrt ist.

Vorausrechnungen zeigen, daß es bei Pos. 2 und 3 zu einem Wechsel der Umlaufrichtung nach ca. 2 h kommt! Diese Vorgänge sind für die thermische Komponentenbelastung im HTR von großer Bedeutung.

Eine erste Rechnung im Vergleich mit der Messung zeigt die Abb. 3 für den Temperaturverlauf innerhalb der Kugelschüttung für Luft mit WT in Pos. 4. Die Abbildung zeigt für 3 verschiedene Höhenpositionen innerhalb der Schüttung den Temperaturverlauf über die Versuchszeit von 3 h. Die ausgezogenen Linien sind mit dem THERMIX-CRAY-Programm unter Berücksichtigung des Loop-Zirkulationsstromes berechnet worden, d.h. der Temperaturverlauf wird geprägt durch Überlagerung und Kopplung der core-internen und -externen Zirkulationsströmung. Dabei wird die core-interne Zirkulation durch eine Wärmesenke am Schüttungszyylinder bzw. ein daraus resultierender Temperaturgradient in Wandnähe angefacht.

Untersuchungen zum Rückhaltevermögen des Decken- bzw. Bodenreflektors hinsichtlich der Spaltproduktfreisetzung

-----

Theoretische Untersuchungen, die mit dem im IRB entwickelten Rechenprogramm PATRAS-CORE durchgeführt wurden, zeigten, daß bei Core-Aufheizstörfällen der Deckenreflektor bzw. Bodenreflektor eine wirksame Barriere für freigesetzte Spaltprodukte ist bzw. konstruktiv zu einer solchen gestaltet werden kann!

Es wurde eine Versuchsanlage gebaut, mit dem Ziel,

- das Rückhaltepotential (Retardierung) des Deckenreflektors im Simulationsexperiment mit Cs zu demonstrieren,
- die Transportvorgänge von Cs im Graphit unter relevanten Störfallbedingungen zu untersuchen,
- das Rechenprogramm PATRAS-CORE zu überprüfen.



In der abgebildeten Versuchsanlage (Abb. 4), wurden die Retardierungs-Eigenschaften von Reflektor-Graphit ASR-1RS und die Transportvorgänge unter HTR-relevanten Störfallbedingungen untersucht. Dabei wurden die Abmessungen des Graphit-Zylinders und der Strömungskanäle so gewählt, daß in Verbindung mit der Strömungsgeschwindigkeit des Trägergases Argon der Cs-Transport ähnlich dem eines Deckenreflektors ist, bei dem die heliumdurchströmte Fläche 30 % der Gesamtfläche und der Kanaldurchmesser 3 cm beträgt und die übrigen Parameter Druck, Strömungsgeschwindigkeit und Temperatur wie in der Versuchsanlage sind.

Das Trägergas wurde über eine Flaschenbatterie mit anschließender Reinigung ( $O_2$ ,  $H_2 \leq 1$  ppm) den Öfen mit der Graphit-Probe zugeführt. Vor Eintritt in die Öfen durchströmte das Trägergas die Cäsium-Quelle, in der nach dem Diffusionsprinzip das Gas mit einem wählbaren Cs-Partialdruck ( $5 \times 10^{-7}$  bis  $10^{-4}$  bar) für eine bestimmte Zeit mit Cs beladen wurde. Der Cs-Diffusionsstrom in der Quelle konnte über die sehr genaue Temperaturregelung des flüssigen Cs-Bades reproduzierbar eingestellt werden, so daß die in die Versuchsstrecke eingeleitete Cs-Menge bestimmbar war. Nach Durchströmung der Graphit-Probe wurde der Trägergasstrom in einen der beiden parallelgeschalteten Cs-Abscheider geführt und dort in den beiden hintereinandergeschalteten Abscheide-Patronen das restliche Cäsium aus dem Trägergas abgeschieden. Die Cs-Abscheide-Patronen, ein zylindrisches Stahlblech-Paket von  $500\text{ cm}^2$  Oberfläche, wurden über einen Kühlkreis auf  $-20\text{ }^\circ\text{C}$  gehalten. In bestimmten Zeitabständen wurden die Patronen dem Abscheider zur Bestimmung des Rest-Cäsiums entnommen. Die Bestimmung des Cs-Gehaltes erfolgte dann mit einem Atom-Absorptions-Spektrometer Typ AA6. Das Cs wurde durch Tauchen der Patronen in eine  $0,01\text{ n HCl}$ -Lösung abgewaschen und somit in einen meßbaren Zustand überführt.

Aus der Differenz der Cs-Beladung und der gemessenen Abscheidung konnte zu bestimmten Zeitpunkten dann die in der Graphit-Probe verbliebene Cs-Menge berechnet werden. Eine Kontrolle der Cs-Beladung war vor oder nach jedem Versuch über den Cs-Vorabscheider, der zwischen Quelle und Ofen installiert war, möglich.

Vor jedem Versuch wurde die Anlage evakuiert und dann vom Trägergas mit einem Druck von 1100 mbar durchströmt. Wenn der temperaturbedingte Beharungszustand erreicht war, wurde die Cs-Quelle geöffnet und die Beladung

des Trägergases erfolgte dann über einen Zeitraum von 10 bzw. 5 h, bei einem über die Quelltemperatur eingestellten Cs-Partialdruck von  $p = 10^{-6}$  bzw.  $5 \times 10^{-6}$  bar. Die Durchflußmenge betrug dabei  $V = 0,3 \times 10^{-3} \text{ Nm}^3/\text{s}$ .

Im Experiment wurde der sogenannte "Escape-Faktor"  $\delta$  bestimmt, der dem Verhältnis der am Austritt der Graphit-Probe gemessenen integralen Cs-Menge zu der bis zu diesem Zeitpunkt in die Versuchsstrecke eingegebenen Cs-Menge entspricht. Die "Retardierung", d.h. das zeitliche Rückhaltevermögen der Graphit-Probe ist also  $1-\delta$ .

In der Abb. 5 sind die experimentell ermittelten und die berechneten "Escape-Faktoren" in Abhängigkeit von der Zeit wiedergegeben. Bei einem konstanten Cs-Eingangs-Partialdruck von  $10^{-6}$  bar mit einem konstanten Argon Trägergasstrom von  $0,3 \times 10^{-3} \text{ Nm}^3/\text{s}$  und bei einer Cs-Beladezeit von 10 h ergibt sich eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen Rechnung und Experiment. Variiert wurde die Temperatur der Graphit-Probe in den einzelnen Versuchen. Die geringste Retardierung weist die Probe bei ca. 950 °C auf! Weitere Versuche bei höheren und niedrigeren Probertemperaturen, mit verschiedenen Cs-Partialdrücken und Trägergasgeschwindigkeiten sind vorgesehen.

Mit dem Rechenprogramm PATRAS-CORE wurden erste belastbare Aussagen über das Rückhaltevermögen des Deckenreflektors bei einer HTR-Anlage im Falle eines Coreaufheizstörfalles gemacht. Mit den Referenzdaten der Firma HRB für den geometrischen Aufbau und für die Temperaturtransienten des HTR-500 Deckenreflektors wurde über eine Zeitspanne von 1000 h die Retardierung gerechnet.

Dabei wurde pessimistisch angenommen, daß der maximale He-Konvektionsstrom von 0,1 g/h (nach ca. 50 h) während der ganzen Zeitspanne herrscht (Kurve 2, Abb. 6).

Um eventuelle Unsicherheiten in der angegebenen Referenztemperatur-Verteilung zu umgehen, wurde eine Rechnung durchgeführt (Kurve 1), bei der die auftretenden höchsten Temperaturen (nach ca. 100 h) als konstant über die gesamte Störfallzeit betrachtet wurden.

Für die Berechnungen wurde hinsichtlich des Cs-Partialdruckes an der Deckenreflektor-Unterkante davon ausgegangen, daß in 200 h ca. 3 % des Cs-

Inventars dort ankommt.

In Anbetracht aller Unsicherheiten kann davon ausgegangen werden, daß bei dem angenommenen Störfall der "Escape-Faktor" des Deckenreflektors unterhalb von  $10^{-13}$  liegt.

Der Deckenreflektor des HTR-500 wirkt also hinsichtlich des Spaltprodukts Cs quasi wie ein absolutes Filter.

Da die geometrischen Parameter des Decken- bzw. Bodenreflektors die Retardierung stark beeinflussen, lassen sich durch konstruktive Maßnahmen weitere Verbesserungen erzielen.

### Zusammenfassung

Für die Größe des Schadenspotentials eines hypothetischen Coreaufheizungsstörfalles bei einem HTR-500-Reaktor spielt die Wechselwirkung des Cs mit dem Graphit des Deckenreflektors eine entscheidende Rolle. Mit Hilfe eines umfassenden Modells und Rechenprogramms "PATRAS-CORE", das den Spaltprodukttransport durch das Kühlgas und die Wechselwirkung mit den an das Core angrenzenden Graphitstrukturen beschreibt, konnte für den hypothetischen Störfall ungehinderter Coreaufheizung eines HTR-500 gezeigt werden, daß der Deckenreflektor selbst unter den extremen Unfallbedingungen für Cs eine sehr große Barriere ist, d.h. praktisch selbst für extreme Störfallzeiten ein großes Rückhaltevermögen besitzt. Das Rechenprogramm

"PATRAS-CORE" wurde in dynamischen Versuchen unter realistischen Geometrien und Störfallbedingungen experimentell verifiziert und damit auch experimentell das große Retardierungspotential eines Graphitdeckenreflektors nachgewiesen. Selbst bei den extremen Störfalltemperaturen des Graphitreflektors von über 1000 °C und extrem großer Störfalldauer von 1000 h beträgt das Potential des Rückhaltefaktors des Deckenreflektors  $10^{13}$ .

Zur Auslotung der aufgezeigten inhärenten und passiven Sicherheitseigenschaften als Basis eines fortgeschrittenen Sicherheitskonzeptes des HTRs, sind die Simulationsmethoden zu verfeinern und in weiteren Sicherheitsexperimenten abzustützen, insbesondere im Hinblick auf zukünftige Genehmigungsverfahren.

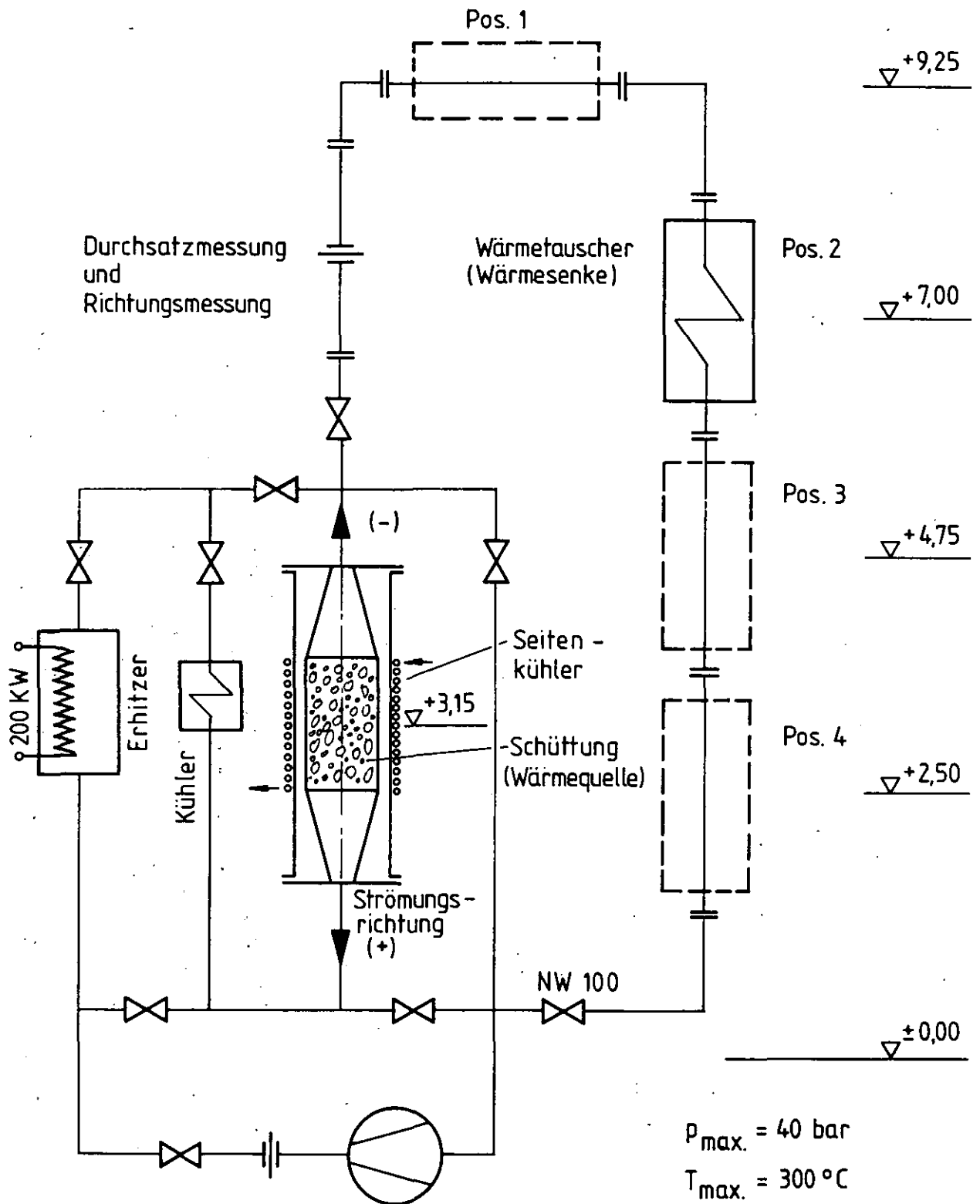
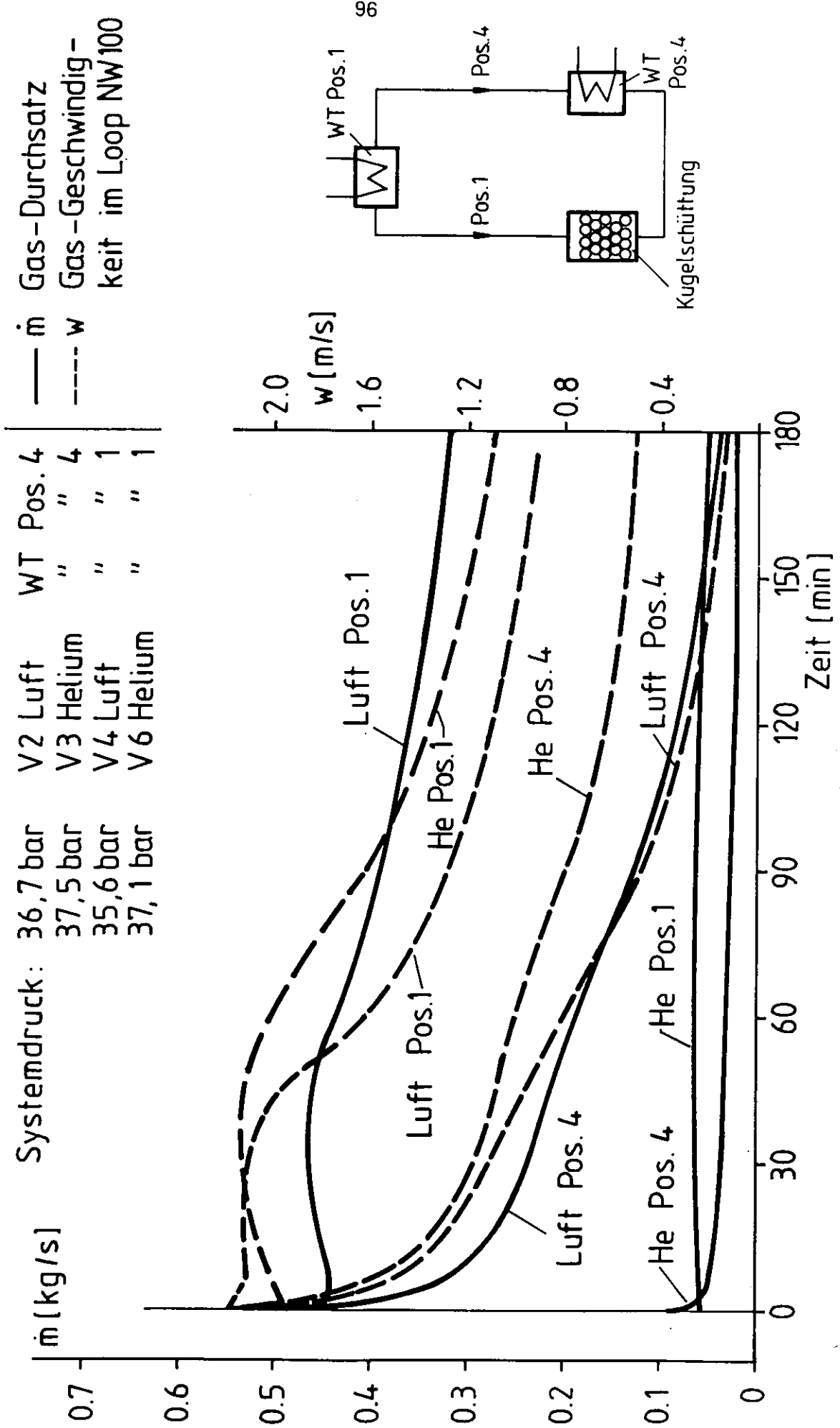


Abb.: 1 THERMIX – Versuchsanlage IRB



Gemessener Gasdurchsatz bei Naturzirkulation im THERMIX - Loop  
 Abb.: 2

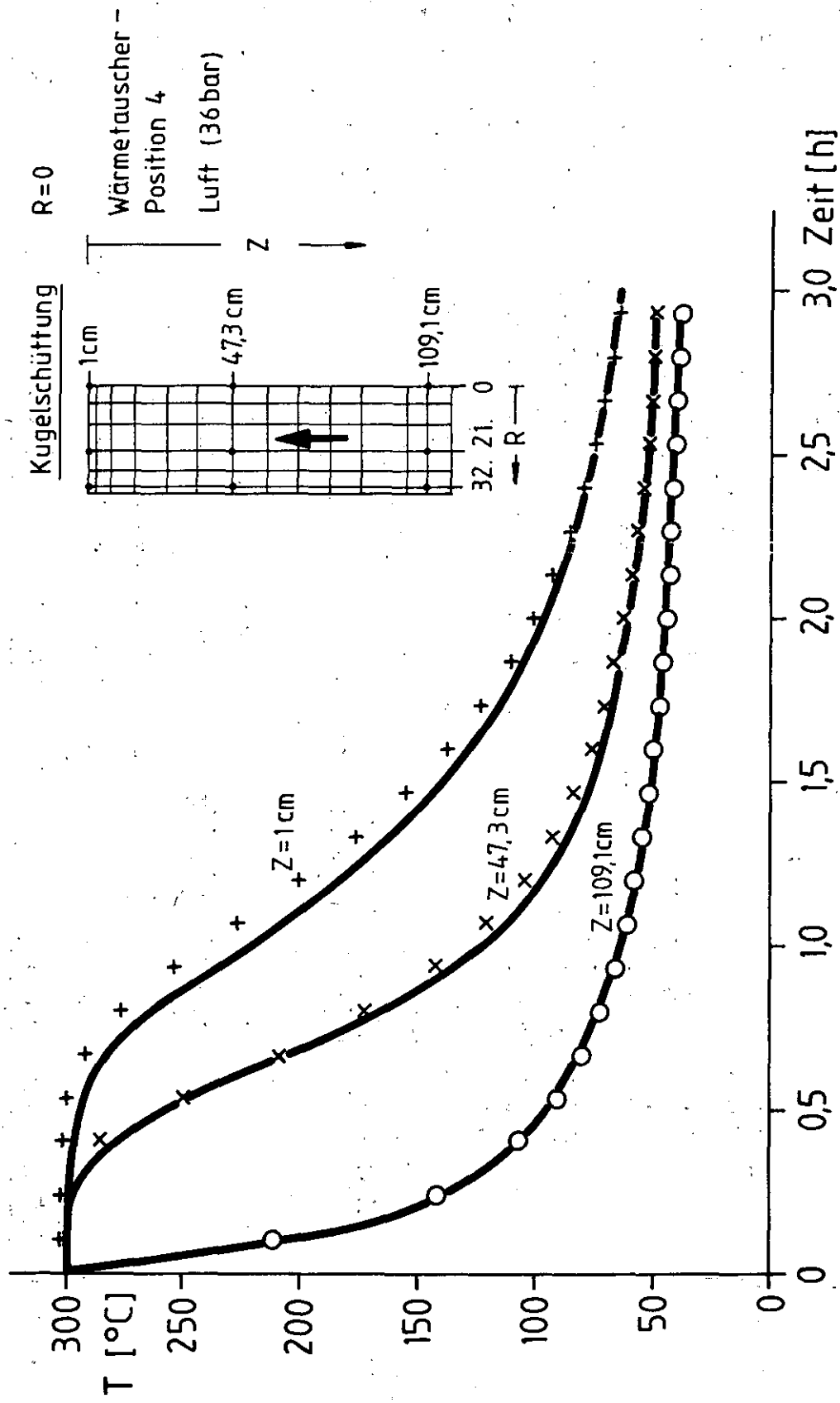


Abb.: 3 Temperaturtransienten in der Kugelschüttung  
Vergleich Rechnung - Experiment

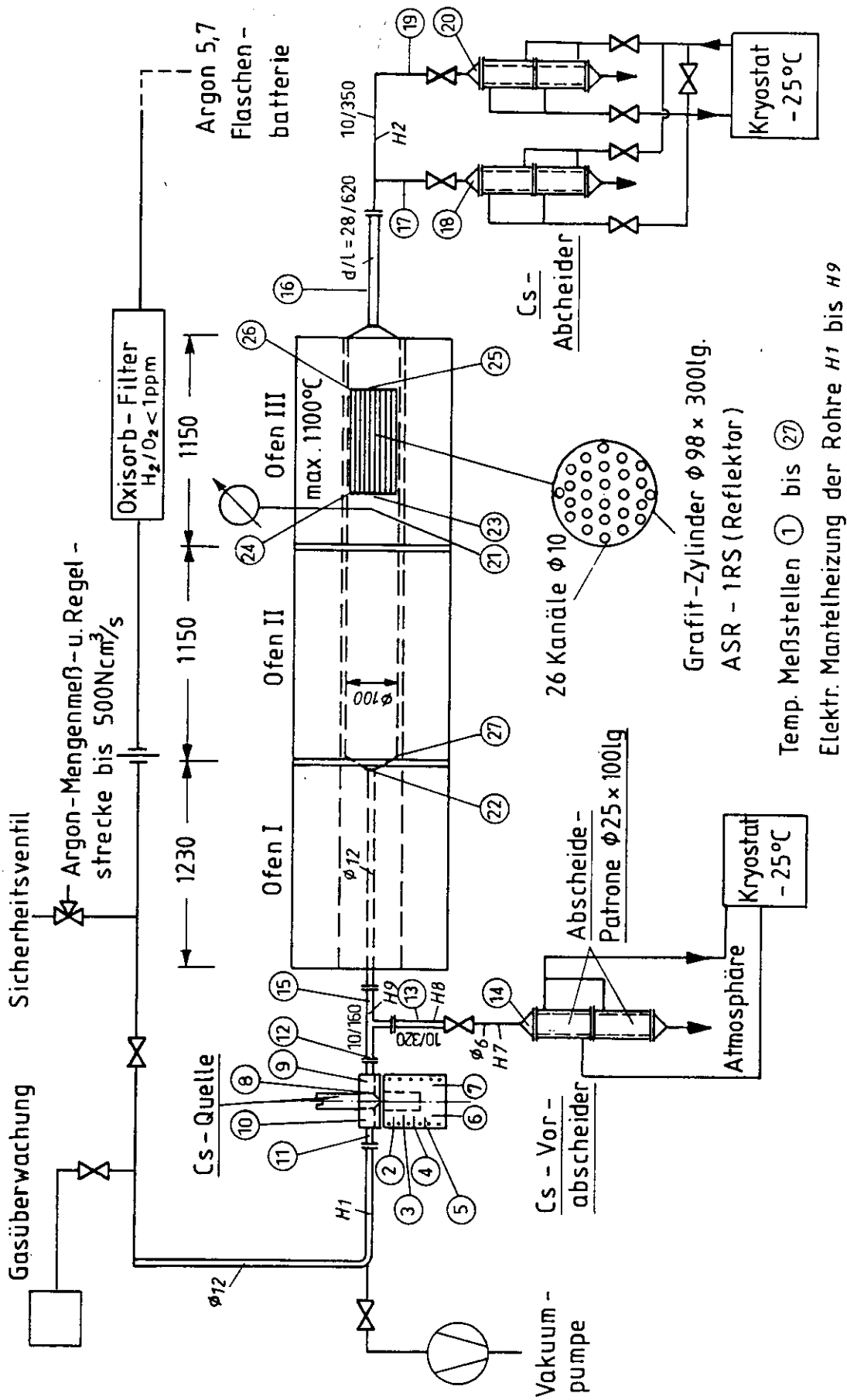


Abb.: 4 Versuchsanlage zur Messung der Caesium-Retardierung im Grafit IRB

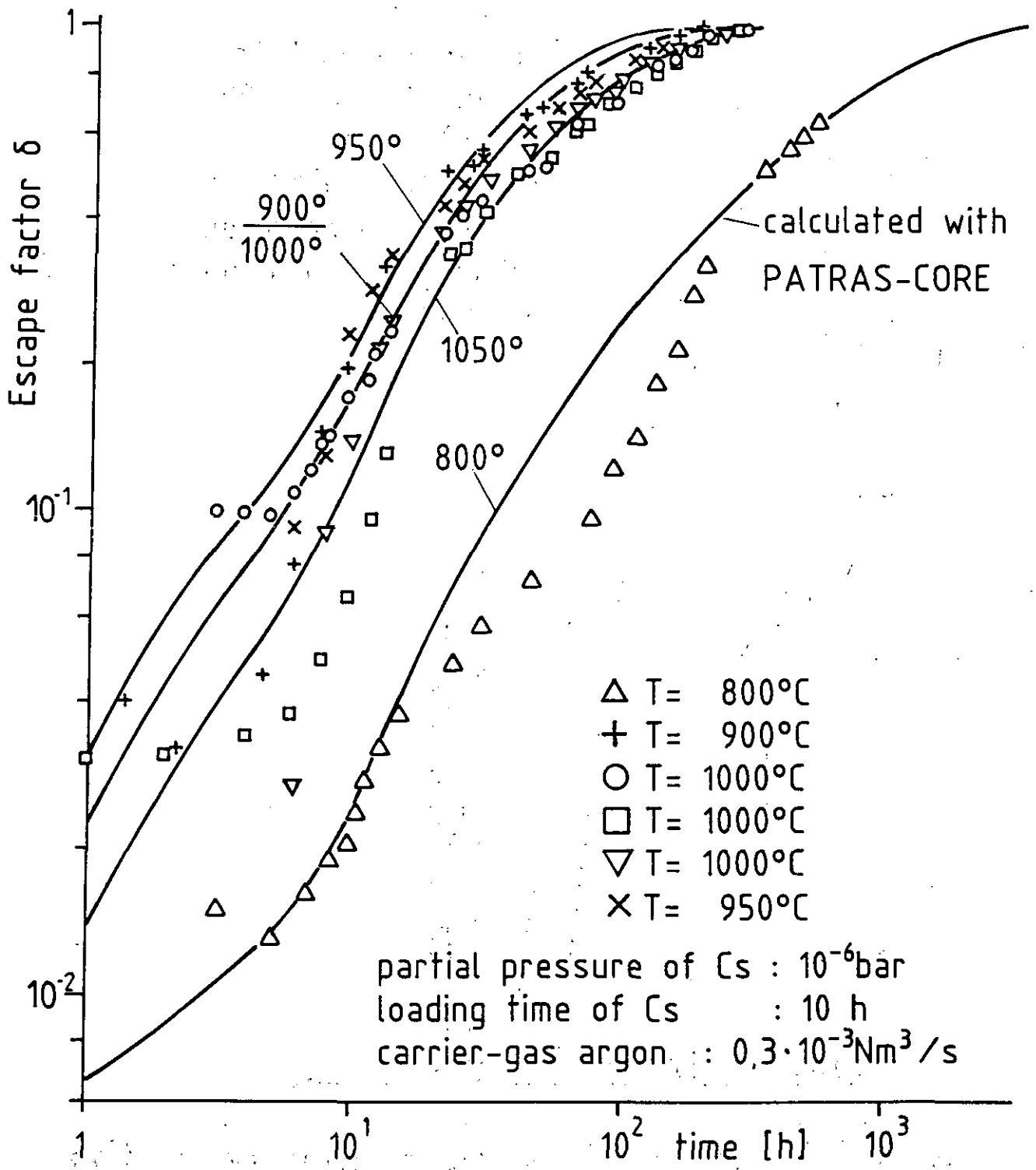


Abb.:5 Escape factor as a function of time and temperature



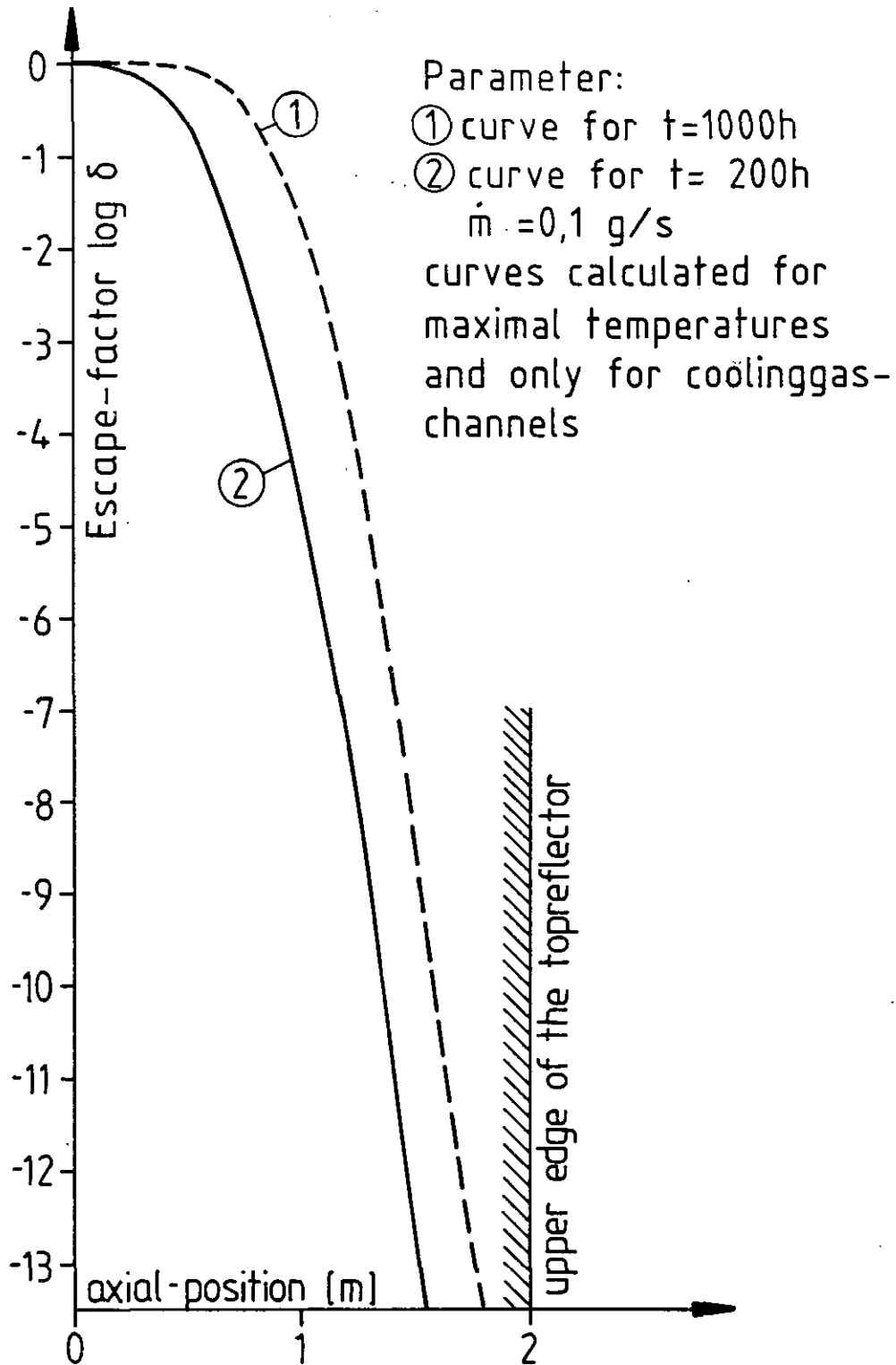


Abb.:6 Escape-factors as a function of the axial position along the topreflector